



Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes : Fonds écologique et inconnu commun

Elsa Berthet

► To cite this version:

Elsa Berthet. Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes : Fonds écologique et inconnu commun : Fonds écologique et inconnu commun. Economies et finances. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013. Français. NNT : 2013ENMP0016 . pastel-00874630

HAL Id: pastel-00874630

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00874630>

Submitted on 18 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 396 : Économie, Organisations & Société

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Sciences de Gestion ”

présentée et soutenue publiquement par

Elsa BERTHET

le 23 septembre 2013

Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes
Fonds écologique et inconnu commun

Directrice de thèse : **Blanche SEGRESTIN**

Directeur de thèse : **Egizio VALCESCHINI**

Jury

M. Jean-Pierre BRECHET, Professeur, IAE, Université de Nantes
Mme Sandra LAVOREL, Directrice de recherches, LECA, CNRS
M. Sylvain LENFLE, Maître de conférences, THEMA, Université de Cergy-Pontoise
M. Jean-Marc MEYNARD, Directeur de recherches, UMR Sadapt, INRA
M. Michel NAKHLA, Professeur, CGS, Mines Paristech - AgroParisTech
Mme Blanche SEGRESTIN, Professeur, CGS, Mines Paristech
M. Egizio VALCESCHINI, Directeur de recherches, UMR Sadapt, INRA
M. Vincent BRETAGNOLLE, Directeur de recherches, CEBC, CNRS

Rapporteur
Examinatrice
Rapporteur
Examineur
Président du jury
Examinatrice
Examineur
Membre invité

**T
H
È
S
E**

Mines ParisTech n’entend donner aucune approbation ni improbation
aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être
considérées comme propres à l’auteur.

Remerciements

Ces trois années passées au sein de différents laboratoires de recherche, le CGS de l'Ecole des Mines, l'UMR Sadapt de l'INRA et le CEBC du CNRS ont été d'une grande richesse. Cette richesse, je la dois à l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu interagir et à qui je voudrais à présent exprimer ma reconnaissance.

Je tiens à adresser mes plus profonds remerciements à Blanche Segrestin pour m'avoir accompagnée jour après jour dans la réalisation de cette thèse. Je la remercie pour sa disponibilité, ses idées et ses conseils précieux, et plus généralement pour la qualité de l'encadrement dont j'ai bénéficié durant toute la thèse.

Je remercie vivement Egizio Valceschini qui s'est beaucoup impliqué pour que ce projet de thèse se réalise, qui a contribué à son suivi scientifique et m'a fait part de conseils avisés sur mon parcours dans la recherche.

Mes remerciements s'adressent également à Vincent Bretagnolle pour son accueil à Chizé et pour sa grande implication dans mon travail de recherche. J'ai beaucoup apprécié nos discussions sur l'écologie, sur la discipline scientifique elle-même, mais aussi sur l'avenir de la planète.

Je tiens à remercier l'ensemble des chercheurs du CGS, pour leur accueil et pour l'intérêt continu qu'ils ont manifesté vis-à-vis de mon travail un peu « ovni » à l'Ecole des Mines. J'exprime toute ma gratitude à Benoit Weil qui, du début à la fin de ma thèse, s'est toujours montré disponible pour me faire part de ses conseils de grande qualité. Je le remercie aussi de m'avoir permis de rendre visibles mes travaux auprès de différentes communautés scientifiques. Je suis également très reconnaissante envers Pascal Le Masson qui m'a suggéré des idées très précieuses pour m'aider à mener à bien ce travail. Je remercie Franck Aggeri et Armand Hatchuel pour leurs éclairages très instructifs sur ma recherche. Plus largement, je voudrais remercier le collectif de la Chaire TMCI qui a constitué un écrin scientifique particulièrement stimulant, et dont beaucoup de travaux ont alimenté mes réflexions.

Je remercie également l'ensemble des chercheurs de l'UMR Sadapt avec qui j'ai pu interagir. Je remercie en particulier Muriel Tichit pour m'avoir invitée à présenter mes travaux à des chercheurs et à des étudiants, et pour m'avoir fait à plusieurs reprises des suggestions très pertinentes pour les améliorer. Je remercie également Marianne Le Bail et Philippe Martin pour l'intérêt qu'ils ont manifesté vis-à-vis de ma recherche du début à la fin, et pour m'avoir fait intervenir dans différentes activités d'enseignement. Je remercie Jean-Marc Meynard pour ses nombreux conseils, et Rodolphe Sabatier pour ses encouragements et ses relectures.

Je voudrais remercier tout particulièrement Marine Agogué pour son enthousiasme vis-à-vis de mes travaux et pour avoir relu l'ensemble de ma thèse. J'ai beaucoup appris lors de nos collaborations, que ce soit avec l'entreprise Nutriset ou pour l'écriture d'articles.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Laurent Lapchin pour son enthousiasme et son soutien. Merci aux chercheurs du collectif SERENA, dont le travail sur les services écosystémiques a inspiré beaucoup de réflexions durant ma thèse, de m'avoir invitée à plusieurs reprises pour échanger sur nos travaux respectifs. Un grand merci également à Jacques Baudry et Danièle Magda qui m'ont accordé beaucoup de temps lors d'entretiens très éclairants sur la recherche en écologie. Je remercie les chercheurs avec qui j'ai travaillé dans le cadre de publications et qui ont contribué à nourrir mes réflexions : Julie Labatut, Nathalie Girard, Cécile Barnaud, Guillaume Martin, Jean-Marc Meynard, Marie-Hélène Jeuffroy, Marianne Cerf et Lorène Prost.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ce travail de thèse.

Je remercie Eric Guilbot, Jacques Trouvat et Arnaud Moizand de la coopérative CEA, pour leur collaboration et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ma recherche. Mes remerciements s'adressent plus largement toutes les personnes que j'ai sollicitées dans la région de Chizé pour des entretiens et des réunions diverses.

Mes remerciements s'adressent également à Morgane Le Moigno, Florence Barre, Céline Bourdon, Martine Jouanon, Stéphanie Brunet et Evelyse Rouby pour leur gentillesse et pour m'avoir guidée dans les différentes procédures administratives liées à la thèse.

Je remercie tous les chercheurs et les doctorants du CEBC pour les échanges que nous avons eus. Un grand merci à Mathieu, Kevin, Jade, Aurélie, Bertrand, Hélène et Vincent D. pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé lors de mes passages à Chizé. Cela a toujours été un plaisir de passer quelques heures en leur compagnie, et de m'échapper de la cohue parisienne pour profiter de la campagne verdoyante des Deux-Sèvres.

Merci à Ingi Brown pour ses relectures du manuscrit, mais aussi pour son écoute, ses conseils et son amitié. Merci à Marine Colon pour tous les échanges que nous avons eus et que nous continuerons d'avoir, sur la thèse et sur nos nouvelles vies ! Je remercie également tous les doctorants et jeunes docteurs parisiens que j'ai eu la chance de côtoyer, pour leur soutien et pour les bons moments passés ensemble, avec une pensée particulière pour Olga L., Rochdi, Fred D. et Julie R.

Un grand merci à mes amis de longue date pour m'avoir écoutée et encouragée pendant toutes ces années, et changé les idées quand il le fallait ! Je suis particulièrement reconnaissante envers ma famille, en particulier mes parents et mes frères et sœurs, qui m'ont beaucoup soutenue et qui ont toujours cru en moi. Je remercie mon père pour sa relecture enthousiaste du manuscrit. Enfin, un merci infini à Fabien pour son soutien de chaque instant, sa patience, ses encouragements et sa confiance qui m'ont permis d'accomplir ce projet qui me tenait tant à cœur.

Cette thèse a été financée par l'INRA dans le cadre d'un contrat
d'Attaché Scientifique Contractuel.



Sommaire

SOMMAIRE.....	3
INTRODUCTION GENERALE. L'AGRICULTURE A L'EPREUVE DE L'ENVIRONNEMENT : DE NOUVEAUX ENJEUX DE CONCEPTION	7
CHAPITRE I. PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE ET OBJECTIF DE LA THESE	8
1. <i>Phénoménologie d'une crise environnementale de l'agriculture sans précédent.....</i>	<i>8</i>
a. Les impacts de la modernisation agricole sur les écosystèmes	8
b. Des dégradations qui ne sont plus justifiées par des augmentations de rendement.....	10
c. Des réponses multiples mais limitées : la nécessité de soutenir l'innovation	11
2. <i>Hypothèse de travail et questions de recherche.....</i>	<i>14</i>
a. Hypothèse : soutenir l'innovation par la conception des agro-écosystèmes.....	14
b. Questions de recherche	15
CHAPITRE II. STRATEGIE DE RECHERCHE.....	16
1. <i>Faire converger agronomie et écologie par la conception.....</i>	<i>16</i>
2. <i>La théorie C-K, une théorie de la conception rendant compte de la génération d'objets nouveaux.....</i>	<i>17</i>
3. <i>Plan de thèse</i>	<i>20</i>
PARTIE 1 : RELIRE LA CRISE ENVIRONNEMENTALE DE L'AGRICULTURE : AGRONOMIE ET ECOLOGIE, UNE CONVERGENCE IMPOSSIBLE ?	23
INTRODUCTION DE LA PARTIE 1	23
CHAPITRE I. LA CONCEPTION AGRICOLE, UNE TRAJECTOIRE QUI S'AFFRANCHIT DES CONTINGENCES DE L'ENVIRONNEMENT	24
1. <i>Optimiser la production : un rétrécissement progressif des objets de la conception</i>	<i>24</i>
a. De la préhistoire au XVIIIe siècle, des objets de conception à grande échelle et collectifs	24
b. La suppression de la jachère à partir de la fin du XVIIIe siècle, une révolution ouvrant la voie de l'intensification agricole à l'échelle de la parcelle	28
2. <i>Une conception réglée rendue possible par le découplage entre agriculture et environnement.....</i>	<i>38</i>
a. Le découplage entre les objets de conception et leur environnement	38
b. La mise en place d'un système de conception réglée performant.....	43
3. <i>Mise en évidence des limites de la trajectoire agricole par la crise environnementale</i>	<i>45</i>
a. La prise en compte de l'hétérogénéité des conditions de culture et conception d'objets plus intégrés	45
b. Les préoccupations environnementales et la remise en cause du régime de conception dominant de l'agriculture	47
c. Des efforts engagés mais qui restent à poursuivre	49
CHAPITRE II. PROGRES DE LA MODELISATION EN ECOLOGIE : LA MISE EN EVIDENCE DE LA COMPLEXITE DES REGULATIONS ECOLOGIQUES	51
1. <i>Une généalogie des modèles de l'écologie : de la géographie des plantes aux écosystèmes</i>	<i>51</i>
a. L'analyse des interactions entre les êtres vivants et avec leur milieu : les travaux précurseurs d'une discipline.....	51
b. La naissance de l'écologie : modéliser les interactions pour comprendre les phénomènes de régulation	55
c. Le concept d'écosystème : rendre visibles les régulations écologiques cachées	58
2. <i>Une interprétation de la crise environnementale de l'agriculture : d'une crise des savoirs à une crise de l'action.....</i>	<i>65</i>
a. La crise des savoirs en agronomie	65
b. Un paradoxe : des connaissances en écologie qui mènent d'une crise des savoirs à une crise de l'action.....	67

CHAPITRE III. LA CONCEPTION DES AGRO-ECOSYSTEMES, UNE NOUVELLE PERSPECTIVE ?.....	69
1. <i>L'agro-écosystème : un point aveugle de l'agronomie et de l'écologie</i>	69
a. L'occultation progressive de l'écosystème dans la conception agronomique.....	69
b. L'absence de l'écosystème cultivé dans les travaux de l'écologie	69
2. <i>De nouveaux concepts qui tournent l'écologie vers la gestion des milieux cultivés</i>	70
a. De l'équilibre à la trajectoire des écosystèmes	70
b. De l'écosystème au paysage hétérogène : un nouveau concept pour donner prise à l'action ?.....	71
3. <i>L'agro-écosystème comme nouvel objet de conception ?</i>	77
a. L'émergence du concept d'agro-écosystème	77
b. L'agro-écosystème, une énigme pour la conception ?	79
CONCLUSION DE LA PARTIE 1	82
PARTIE 2 : SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET BIENS COMMUNS : INTERETS ET LIMITES POUR LA CONCEPTION DES AGRO-ECOSYSTEMES.....	83
INTRODUCTION DE LA PARTIE 2	83
CHAPITRE I. LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES : MISE EN EVIDENCE DES SPECIFICITES DES ECOSYSTEMES MAIS DIFFICULTES D'OPERATIONNALISATION.....	84
1. <i>Les services écosystémiques : une métaphore pour renouveler la représentation des écosystèmes</i>	84
a. Biodiversité et services écosystémiques, des notions introduites pour sensibiliser à la protection de l'environnement.....	84
b. L'agenda de recherche ouvert par la notion de services écosystémiques	92
2. <i>Les limites et difficultés de l'opérationnalisation des services écosystémiques</i>	100
a. Les confusions liées à la notion de services écosystémiques.....	100
b. Les limites d'une approche économique des services écosystémiques	106
CHAPITRE II. LES BIENS COMMUNS : ENRICHISSEMENT DES MODES D'ACTION COLLECTIVE, MAIS HYPOTHESES CONTESTABLES SUR LES RESSOURCES A GERER	110
1. <i>De nouvelles perspectives sur l'action collective</i>	110
a. La « tragédie des biens communs » dans la littérature économique	110
b. L'auto-organisation des acteurs, une troisième voie pour prendre en compte les spécificités des systèmes de ressources.....	113
c. De la gouvernance des biens communs à celle des socio-écosystèmes : comment prendre en compte la complexité et l'imprévisibilité ?	117
2. <i>Vers une « dénaturalisation » des biens communs : une analyse sous l'angle de la conception</i>	119
a. Les hypothèses implicites dans l'approche d'Ostrom et de l'École de Bloomington	119
b. L'émergence d'une littérature sur les biens communs à concevoir	124
c. Un enjeu scientifique et managérial : traiter des situations dans lesquelles une action collective est nécessaire, mais pour lesquelles il n'y a pas de bien commun identifié.....	126
CONCLUSION DE LA PARTIE 2.....	127
PARTIE 3 : DE LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT A LA CONCEPTION D'UN AGRO-ECOSYSTEME : ANALYSE D'UN CAS EMPIRIQUE EN REGION D'AGRICULTURE CEREALIERE INTENSIVE	129
INTRODUCTION DE LA PARTIE 3	129

CHAPITRE I. UN ARCHETYPE DE L'AGRICULTURE INTENSIVE A LA RECHERCHE D'UNE TRANSITION ENVIRONNEMENTALE	130
1. <i>Préambule : le choix de l'étude de cas</i>	130
2. <i>Un cas archétypique : une plaine de culture intensive à l'épreuve de la crise environnementale</i>	131
3. <i>Le système d'acteurs et son projet</i>	135
a. Un acteur scientifique : le Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC)	135
b. Un acteur agricole : la Coopérative Entente Agricole (CEA)	137
c. Un projet territorial : donner une cohérence agro-environnementale à une superposition de territoires	139
CHAPITRE II. UNE METHODOLOGIE POUR ACCOMPAGNER LES ACTEURS DANS UNE DEMARCHE DE CONCEPTION D'UN AGRO-ECOSYSTEME	142
1. <i>Une recherche-intervention : objectif et justification</i>	142
2. <i>Méthodologie pour collecter les données et accompagner le processus de conception</i>	144
a. Analyse rétrospective du travail de recherche-action des écologues	145
b. La recherche-intervention pour accompagner la mise en place du projet de filière luzerne	146
CHAPITRE III. DEBLOQUER UN PROCESSUS D'INNOVATION PAR LA CONCEPTION D'UN AGRO-ECOSYSTEME	152
1. <i>Concilier production agricole et conservation de la biodiversité : un projet d'internalisation économique d'un service écosystémique</i>	152
a. Reconstitution du raisonnement des écologues identifiant la luzerne comme solution au déclin de la biodiversité dans la plaine	153
b. L'internalisation économique de la biodiversité, une voie privilégiée	158
2. <i>Enseignement du projet de filière luzerne : la nécessité d'inventer une démarche collective pour concevoir l'agro-écosystème</i>	164
a. Des difficultés inattendues riches d'enseignement.....	164
b. Ouvrir les options : vers un déblocage du projet par l'exploration de la multiplicité des fonctions et valeurs potentielles de la luzerne.....	166
c. Inventer une gouvernance adaptée au pilotage d'un projet innovant de filière luzerne	175
CONCLUSION DE LA PARTIE 3.....	179
PARTIE 4 : MODELE POUR LA CONCEPTION COLLECTIVE DES AGRO-ECOSYSTEMES ET IMPLICATIONS MANAGERIALES.....	181
INTRODUCTION DE LA PARTIE 4	181
CHAPITRE I. PROPOSITION D'UN MODELE POUR LA CONCEPTION D'UN AGRO-ECOSYSTEME	181
1. <i>Changer de perspective pour innover : de la modélisation à la conception des agro-écosystèmes</i>	181
a. Préambule : l'intérêt de la conception pour traiter des agro-écosystèmes.....	181
b. En quoi la conception diffère-t-elle des processus de modélisation et de décision ?.....	182
2. <i>Un modèle pour qualifier l'objet de la conception et identifier le collectif à impliquer</i>	188
a. Dépasser les limites du modèle « stock-flux » : les apports de Georgescu-Roegen.....	188
b. Le modèle « fonds écologique, sous-jacent et inconnu commun »	191
c. Portée interprétative du modèle sur le cas empirique étudié	197
CHAPITRE II. IMPLICATIONS MANAGERIALES : PILOTER LA CONCEPTION D'UN AGRO-ECOSYSTEME.....	200
1. <i>Du bien commun à l'inconnu commun</i>	200
2. <i>Enjeux de gouvernance et défis managériaux associés</i>	203
a. Surmonter les situations de divergences et de conflits qui bloquent l'innovation	204
b. Surmonter les verrouillages et les effets de fixation.....	205
c. Mettre en place des règles de gouvernance du fonds écologique.....	206

d. Assurer le suivi collectif et à long terme de la trajectoire de l'agro-écosystème.....	207
3. <i>Quelles formes managériales pour la conception d'un agro-écosystème ? Implications pour le secteur agricole.....</i>	209
a. Les collèges de l'inconnu.....	209
b. Vers des collèges de l'inconnu dans le secteur agricole ?.....	211
4. <i>De nouvelles perspectives pour les politiques publiques et pour la recherche.....</i>	212
CONCLUSION DE LA PARTIE 4.....	214
CONCLUSION GENERALE.....	215
RAPPEL DES PRINCIPAUX RESULTATS DE LA THESE.....	215
QUELQUES LIMITES DU TRAVAIL PRESENTE.....	218
QUELQUES PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	218
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	220
LISTE DES FIGURES	233
LISTE DES TABLEAUX	235
LISTE DES ACRONYMES.....	236
PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES PRODUITES DANS LE CADRE DE LA THESE.....	237
ANNEXES	239
1. <i>Quelques informations sur la luzerne.....</i>	240
2. <i>Organigramme de la coopérative CEA.....</i>	241
3. <i>Listes des personnes rencontrées en entretien</i>	242
a. Liste des personnes interrogées en mai-août 2010.....	242
b. Listes des personnes interrogées en janvier-février 2011	243
4. <i>Atelier de conception du 18 mai 2011</i>	244
a. Liste des participants à l'atelier.....	244
b. Programme de l'atelier	245
c. Exemple de présentation des concepts projecteurs.....	246
5. <i>Extraits du mémoire de C. Bouty et M. Bouviala (2012).....</i>	247
a. Extraits de la grille de notation de l'itinéraire technique « élevage intensif » : notation des services de production 247	
b. Les services écosystémiques pris en compte dans l'outil d'aide à la décision.....	248

Introduction générale. L'agriculture à l'épreuve de l'environnement : de nouveaux enjeux de conception

L'agriculture désigne l'ensemble des activités de transformation du milieu naturel permettant d'obtenir des produits végétaux et animaux utiles à l'homme, en particulier destinés à son alimentation. Ces activités ont fait l'objet, depuis près de 12 000 ans, de nombreuses innovations à la fois techniques et organisationnelles, et l'agriculture est aujourd'hui un secteur hautement productif, tout au moins dans les pays industrialisés. Au cours des dernières décennies, ce secteur a cependant été l'objet de fortes préoccupations environnementales. Son rôle dans la pollution et la dégradation des milieux naturels, sa contribution au changement climatique ou encore à la surexploitation des ressources naturelles sont connus et, souvent, stigmatisés. Face à cette situation, les enjeux pour la recherche sont considérables. Notre thèse souhaite participer aux réflexions sur les causes de cette crise environnementale de l'agriculture et contribuer à l'explication des difficultés rencontrées aujourd'hui pour y remédier. Elle cherche, surtout, à proposer des pistes pour relever les défis d'innovation que cette crise environnementale génère.

La ligne directrice de notre problématique de recherche est une nouvelle interprétation de la crise environnementale de l'agriculture. Selon nous, cette crise est notamment une crise des savoirs sur les processus écologiques affectés par la production agricole. Plus encore, elle est une crise de l'innovation, liée non seulement à la grande complexité de ces processus, mais également à la nature des biens communs que ces processus mettent en jeu au sein des agro-écosystèmes (*i.e.* écosystèmes cultivés¹). Notre hypothèse est que l'on n'accorde pas suffisamment d'importance aux processus de conception spécifiques aux agro-écosystèmes et que l'on est aujourd'hui peu outillé pour le faire. Notre ambition est donc d'élaborer, et de mettre à l'épreuve d'une « situation réelle » (un cas empirique), un cadre conceptuel pour la conception d'un agro-écosystème.

¹ Le Larousse Agricole (2002) définit l'écosystème cultivé comme un « écosystème artificialisé par un groupe humain qui y cultive des plantes et (ou) y élève des animaux domestiques. Un écosystème cultivé est composé d'un milieu physique plus ou moins transformé (épierement, amendement, terrassement, drainage, irrigation, abri, serre...) et d'un milieu vivant modifié (réduction de la végétation et de la faune sauvage, introduction de plantes cultivées et d'animaux domestiques). » L'écosystème est un concept rendant compte de la structure, du fonctionnement et des interrelations entre un milieu physique donné (le biotope) et les êtres vivants qui l'occupent (la biocénose).

Chapitre I. Problématique de recherche et objectif de la thèse

1. Phénoménologie d'une crise environnementale de l'agriculture sans précédent

a. Les impacts de la modernisation agricole sur les écosystèmes

L'agriculture a connu au cours du XX^e siècle une modernisation rapide et une hausse de la productivité extrêmement forte, tout au moins dans les pays industrialisés et dans une partie des pays émergents. On parle d'industrialisation de l'agriculture : d'une part la modernisation de la production agricole s'est essentiellement basée sur la mécanisation et la « chimisation » (utilisation croissante d'engrais et de produits phytosanitaires² chimiques). D'autre part ce secteur a mis en place une division verticale de ses activités, avec des industries amont fournissant des intrants agricoles et des industries aval prenant en charge la transformation et la distribution des produits agro-alimentaires. A l'échelle mondiale, les conséquences de cette modernisation ont été notamment la multiplication par dix des rendements de la production céréalière et des superficies cultivées par exploitant, une forte augmentation de la production de l'élevage³, et une multiplication par plus de cent de la productivité brute du travail agricole (Mazoyer and Roudart 2002). Selon Pretty (2008), la production alimentaire mondiale a augmenté de 145% depuis les années 1960, et notamment de 280% en Asie.

L'agriculture (productions végétales et pâturages) occupe 38% de la surface émergée de la planète et constitue en cela l'usage des terres le plus important avec la forêt ; le reste étant constitué de déserts, montagnes, toundra, villes, réserves écologiques, etc. (Foley *et al.* 2011). La modernisation agricole a eu de nombreux impacts sur l'environnement, contribuant largement à la dégradation des écosystèmes observée au niveau mondial depuis plusieurs décennies. La crise environnementale est pour une grande part une crise des écosystèmes. Aujourd'hui, l'ensemble des écosystèmes de la planète est touché de près ou de loin par les activités humaines : exploitation intensive des ressources, pâturage, chasse ou pêche, fragmentation des paysages liée aux infrastructures, ou encore émissions de gaz à effet de serre accélérant le changement climatique (Vitousek *et al.* 1997). La crise des écosystèmes est tangible à travers six grands types de dégradations liées aux activités agricoles : la dégradation des sols, la consommation en eau, la

² Relatif à la protection des cultures et des produits récoltés. (*Larousse Agricole 2002*)

³ Selon Pretty (2008) : multiplication par quatre du nombre de poulets, par deux du nombre de porcs, tandis que la production de bovins, ovins et caprins a augmenté de 40 à 50% à l'échelle mondiale

dépendance aux énergies non renouvelables, les pollutions diffuses, les émissions de gaz à effet de serre et enfin l'érosion de la biodiversité.

Les pratiques agricoles ont entraîné une forte diminution de la fertilité des sols due à un appauvrissement en nutriments (Altieri *et al.* 1983), et à la dégradation physique des sols. Cette dégradation physique est liée notamment à l'érosion hydrique et au tassement dû à l'utilisation d'engins mécaniques lourds. A cette perte de fertilité s'ajoute une perte des terres cultivées liée au développement urbain et au changement climatique. A titre d'exemple, cette perte correspondait en France à environ 100 000 ha/an dans les années 1990 (Boulaine 1996). Par ailleurs, les surfaces agricoles irriguées ont doublé en 50 ans, et aujourd'hui 70% des prélèvements en eau douce de la planète sont destinés à l'agriculture (Foley *et al.* 2011).

D'un rôle de producteur d'énergie au XIX^e siècle, l'agriculture est devenue à partir de la fin des années 1980 un grand consommateur d'énergie produite par l'industrie ou venant des énergies fossiles (Boulaine 1996). La forte dépendance de cette activité aux énergies non renouvelables est liée à la mécanisation ainsi qu'à l'emploi massif d'engrais et de produits phytosanitaires de synthèse (Altieri *et al.* 1983). La consommation totale d'engrais a augmenté de 500% dans les 50 dernières années (Foley *et al.* 2011), et l'utilisation de produits phytosanitaires a atteint 2,56 millions de tonnes par an (Pretty 2008). La surutilisation des produits de synthèse conduit à des pollutions diffuses : 30 à 80% de l'azote épandu sur les terres agricoles contamine les systèmes hydrologiques et l'atmosphère (*ibid*). Les pollutions sont accentuées par le fait que les fertilisants et produits phytosanitaires se dégradent très lentement et s'accumulent dans les sols et les nappes phréatiques. Cette accumulation contribue à déréguler les cycles biogéochimiques de nutriments tels que l'azote et le phosphore. Selon Vitousek (1997), cela augmente par exemple les concentrations en protoxyde d'azote (N₂O) dans l'atmosphère, un puissant gaz à effet de serre, et contribue à former des pluies acides et du brouillard photochimique.

Enfin, l'agriculture a de forts impacts sur la biodiversité à la fois génétique, spécifique et écosystémique. Les ressources génétiques ont diminué pour ce qui concerne les plantes cultivées et les races animales élevées (Altieri *et al.* 1983; Labatut 2009), puisque la sélection génétique a eu tendance à n'en favoriser qu'un faible nombre. La diversité spécifique est largement altérée par l'agriculture, que les espèces soient inféodées aux milieux agricoles ou non. En effet, celles qui se sont adaptées depuis des milliers d'années aux espaces cultivés sont grandement affectées par l'intensification rapide des pratiques agricoles à l'œuvre depuis les années 1960 (Donald *et al.* 2001; Kleijn *et al.* 2006). Celles vivant dans d'autres milieux sont touchées par l'extension des terres agricoles, notamment dans les zones tropicales. L'agriculture a globalement converti en

cultures 70% des prairies, 50% des savanes, 45% des forêts tempérées et 27% des forêts tropicales (Foley *et al.* 2011). Enfin, selon le Millenium Ecosystem Assessment (2005), 10 à 30% des espèces de mammifères, d'oiseaux et d'amphibiens sont actuellement menacées de disparition.

b. Des dégradations qui ne sont plus justifiées par des augmentations de rendement

Alors que les problèmes liés à ces dégradations environnementales sont identifiés depuis les années 1970, la crise devient particulièrement préoccupante. Contrairement à ce que montre la période des années 1960 à 1980, on observe maintenant que les dégradations de l'environnement ne sont plus contrebalancées par une forte augmentation des rendements agricoles permettant de nourrir une population mondiale en très forte croissance. Les rendements semblent plafonner, tandis que les dégradations s'accroissent. Entre 1985 et 2005, l'augmentation des rendements était de l'ordre de 25%, contre près de 60% entre 1965 et 1985 (Foley *et al.* 2011). Dans certains pays européens, notamment en France, les rendements en céréales stagnent depuis la fin des années 1990 (voir Figure 1).

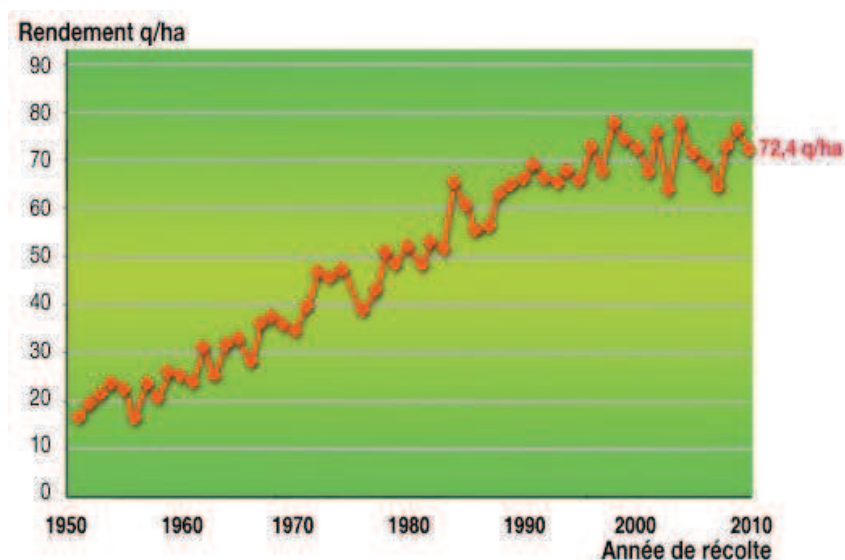


Figure 1 : Evolution du rendement du blé tendre en France depuis 1950 (source GNIS⁴, 2013)

Le modèle agricole actuel semble avoir atteint ses limites d'efficacité tout en entretenant la dynamique de dégradation des écosystèmes. Si l'agriculture est en partie responsable des problèmes liés à la dégradation des écosystèmes, elle en subit aujourd'hui en retour les conséquences (FAO 2007)⁵ par la dégradation ou la raréfaction de certaines ressources qui lui

⁴ <http://www.gnis.fr/index/action/page/id/794/title/Plus-de-rendement-plus-de-qualite>

⁵ FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

sont indispensables. Plusieurs études récentes (FAO 2007; IAASTD 2009) estiment pourtant qu'il serait nécessaire de doubler la production mondiale pour répondre à l'augmentation démographique, aux changements de régimes alimentaires (notamment à l'augmentation de la consommation de viande dans les pays émergents), ou encore à la demande en bioénergies. La prospective Agrimonde (Paillard *et al.* 2010) menée par l'INRA et le CIRAD, indique que cela est envisageable à certaines conditions, et notamment en dépassant les contradictions du modèle agricole actuel.

L'évolution de l'offre alimentaire dans les décennies à venir va bien entendu dépendre, outre de celle des surfaces cultivées, de l'évolution des rendements. L'usage des terres et les modes de mise en valeur ont certes permis de nourrir une population croissante, mais ils l'ont fait au prix de la dégradation de l'environnement et d'une surexploitation des ressources naturelles. L'enjeu à venir est donc de poursuivre la production alimentaire et/ou énergétique sur des espaces où devront être préservés les autres services écosystémiques fournis (biodiversité, stockage du carbone, qualité des sols et de l'eau...).

Savoir comment gérer en cohérence des objectifs en partie contradictoires est, par conséquent, un des enjeux essentiels de l'avenir. Sur la base des expériences passées et des évolutions prévisibles dans le domaine technique mais aussi socio-économique, comment le monde peut-il concilier la contradiction apparente entre l'objectif d'augmenter significativement l'effort productif et la nécessité de le faire sans causer d'autres effets négatifs sur la qualité des terres et la biodiversité ?

c. Des réponses multiples mais limitées : la nécessité de soutenir l'innovation

Diverses solutions ont déjà été envisagées pour concilier production agricole et préservation de l'environnement. Des modèles de production agricole alternatifs émergent en opposition au modèle dit « conventionnel » (*i.e.* intensif en intrants et en énergie). Pretty (2008) en cite un certain nombre :

“Many different expressions have come to be used to imply greater sustainability in some agricultural systems over prevailing ones (both preindustrial and industrialized). These include biodynamic, community based, ecoagriculture, ecological, environmentally sensitive, extensive, farm fresh, free range, low input, organic, permaculture, sustainable and wise use” (Pretty (2008), p. 451).

L'agriculture biologique interdit l'utilisation d'intrants chimiques et d'organismes génétiquement modifiés (OGM), et tente de restaurer des cycles écologiques jusqu'alors substitués par la

technologie. Ce modèle dispose d'un label permettant de reconnaître et valoriser ces pratiques. L'agriculture de conservation est un autre modèle de production qui n'exclut pas complètement les intrants chimiques mais vise à en réduire l'utilisation, et qui porte l'essentiel de son attention sur la préservation des sols (par le non-labour, les couverts végétaux, etc.). Ces modèles alternatifs ont été développés d'abord empiriquement, souvent en opposition à la recherche agronomique. Chacun met l'accent sur des enjeux plus ou moins ciblés et ouvre dans ce cadre de nouvelles voies d'action ; mais aucun n'est en mesure de répondre à l'ensemble des dégradations d'un écosystème.

La recherche agronomique propose de nouveaux concepts, comme celui de l'« agriculture écologiquement intensive » (Griffon 2013). Ils cherchent à amplifier l'usage des fonctionnalités écologiques pour maintenir un haut niveau de production agricole et d'élevage, sans exclure les intrants chimiques ou les OGM. De tels concepts fournissent de nouveaux agendas de recherche. Des feuilles de route sont proposées par les scientifiques et les institutions internationales pour concilier production agricole et préservation de l'environnement (*e.g.* Pretty (2008) ; Fischer *et al.* (2006); Foley *et al.* (2005); FAO (2007) ; MEA (2005)). Par ailleurs, un nombre croissant d'agronomes se penchent sur la « reconception » des systèmes de production agricole (Meynard *et al.* 2006), c'est-à-dire la conception de nouveaux systèmes à partir de systèmes existants, en orientant leur dynamique en faveur de la durabilité. De tels processus de conception cherchent à mieux prendre en compte les équilibres au sein du système, de manière à garantir fertilité, productivité et propriétés de résilience⁶ du système.

Du côté des politiques publiques, divers instruments ont été mis en œuvre. En Europe, la Politique Agricole Commune (PAC) a mis en place depuis 2005 la conditionnalité des aides aux agriculteurs : le versement de certaines aides communautaires est soumis au respect d'exigences de base en matière d'environnement, de « bonnes conditions agricoles et environnementales » (BCAE), de santé, et de protection animale (Source : Ministère de l'agriculture⁷). Des outils contractuels ont également été développés, tels que les Mesures Agro-Environnementales⁸ (MAE). Un certain nombre de réglementations cherchent à restreindre les pratiques agricoles dégradant l'environnement et à encourager des pratiques alternatives, par exemple au niveau Européen la Directive Cadre sur l'Eau, ou les Directives Oiseaux et Habitats à l'origine de la mise en place du réseau d'aires protégées Natura 2000. Au niveau international, dans les pays

⁶ Selon Begon, Townsend *et al.* (2005), la résilience décrit la vitesse à laquelle une communauté retourne à son état initial après qu'une perturbation lui a fait quitter cet état. La résilience se distingue de la résistance qui décrit la capacité d'une communauté à éviter un changement d'état lorsqu'elle est soumise à une perturbation.

⁷ <http://agriculture.gouv.fr/la-conditionnalite>, consulté en juin 2013

⁸ Ce sont des contrats de cinq ans par lesquels les agriculteurs s'engagent à mettre en œuvre des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement contre une subvention annuelle destinée à couvrir les coûts induits et les éventuelles diminutions de revenus.

industrialisés, dans les pays émergents et dans les pays en voie de développement, les politiques en faveur des services écosystémiques telles que les paiements pour services environnementaux ont la faveur des Etats, souvent en coopération avec des organisations environnementales⁹.

Les actions publiques en faveur de la préservation de biens communs environnementaux ont généré et se sont appuyées sur des innovations réglementaires et juridiques, organisationnelles et scientifiques. Au-delà de leurs différences parfois profondes, elles butent sur des difficultés à trois niveaux : (i) celui de l'objet dont elles souhaitent préserver ou améliorer l'état en influençant les pratiques agricoles : il s'agit le plus souvent d'une ressource en particulier (l'eau, la forêt, une espèce animale...) qui est individualisée dans l'écosystème, et a fortiori dans l'agro-écosystème ; (ii) celui de leurs dispositifs d'action : la contractualisation incitative individuelle est l'outil de gestion privilégié, l'action collective lui est subordonnée ou en est déconnectée ; (iii) celui de l'évaluation de leur pertinence : il est difficile de mesurer leur impact et leur efficacité environnementale et, surtout, il est quasiment impossible de relier les performances environnementales aux actions individuelles soutenues, ce qui pose un important problème par rapport au dispositif d'action. Ces difficultés n'invalident pas l'intérêt de ces dispositifs et des politiques publiques associées. Elles nous invitent à mieux comprendre quelles en sont les causes et quelles peuvent être les voies pour les dépasser. Pour notre part, nous chercherons en priorité à identifier et à analyser les voies qui ont trait à un problème de conception.

Malgré toutes ces initiatives, l'impact sur l'environnement reste alarmant et, surtout, le basculement vers un nouveau modèle agricole ne semble pas fondamentalement engagé. Comment permettre à l'agriculture de changer de modèle en s'appuyant sur une nouvelle génération d'innovations ? Et sur quels objets doivent porter ces innovations ?

⁹ Pour une analyse comparative des politiques publiques en matière de services écosystémiques et de services environnementaux à l'échelle mondiale, voir les résultats du programme de recherche SERENA financé par l'ANR, en particulier dans le document : Compte Rendu de l'Atelier de Synthèse du programme Serena (2009-2013), 14-16 mai 2013, Saint Martin de Londres. Cécile BIDAUD, Philippe MERAL, Denis PESCHE. Note de Synthèse n° 2013-02. Jalon 9c

2. Hypothèse de travail et questions de recherche

a. Hypothèse : soutenir l'innovation par la conception des agro-écosystèmes

Mettre au cœur de la problématique la gestion des écosystèmes est une des hypothèses fortes relevées dans les diagnostics ou scénarios¹⁰ de la crise environnementale de l'agriculture. Ils soulignent en effet que :

1. Les solutions proposées sont trop ponctuelles et déconnectées les unes des autres, alors que tout est interdépendant dans les systèmes écologiques. Les scientifiques insistent sur la nécessité d'agir à des échelles variées, allant du local au global (Foley *et al.* 2005). Ils proposent notamment d'agir à l'échelle des écosystèmes, de manière à prendre en compte les problématiques écologiques de façon plus intégrée. Ainsi, Vitousek (1997) souligne :
« *Although conservation efforts focused on individual endangered species have yielded some successes, they are expensive— and the protection or restoration of whole ecosystems often represents the most effective way to sustain genetic, population, and species diversity.* »
2. Le manque de connaissance sur le fonctionnement des systèmes écologiques est un frein au développement de solutions adaptées (Daily 1997; Kremen and Ostfeld 2005; Bennett *et al.* 2009).
3. La prise en compte et la gestion de processus écologiques (eau, biodiversité) ne peut se faire à l'échelle de la parcelle ni de l'exploitation agricole, et requiert une coordination à plus large échelle. Or la mise en œuvre de solutions aux problèmes environnementaux engendre souvent des situations conflictuelles (Pinton 2007). Les instruments d'incitation ne parviennent généralement pas à les surmonter, ce qui empêche la mise en place de solutions vraiment efficaces (Kleijn *et al.* 2006).

Dans cette perspective, une difficulté majeure pour remédier à la crise environnementale est d'améliorer la gestion des écosystèmes de manière à continuer de produire tout en ne remettant pas en cause leur durabilité. Ce défi demande de nouveaux efforts d'innovation (Vanloqueren and Baret 2009). L'identité-même des objets à concevoir et à gérer est instable, qu'il s'agisse d'outils, de variétés à cultiver ou de races animales, de systèmes de production, de systèmes écologiques, etc. Les connaissances manquent, les solutions à la fois efficaces et acceptables pour remédier à cette crise environnementale complexe sont extrêmement difficiles à trouver. De plus, la gestion

¹⁰ Pour une synthèse récente des études et prospectives en la matière, voir : Sustainable food consumption and production in a resource-constrained world. The 3rd SCAR Foresight Exercise European Commission – Standing Committee on Agricultural Research (SCAR), February 2011 Annette Freibauer (chair), Erik Mathijs (rapporteur), Gianluca Brunori, Zoya Damianova, Elie Faroult, Joan Girona i Gomis, Lance O'Brien, Sébastien Treyer

des écosystèmes nécessite d'amener des acteurs qui souvent ont des intérêts divergents vis-à-vis des écosystèmes à agir ensemble. Il faut alors inventer de nouvelles méthodes et de nouveaux modes de gouvernance pour les conduire à se coordonner et à innover ensemble.

La thèse part du constat que la prise en compte des écosystèmes soulève des problèmes de gestion de l'innovation nouveaux pour le secteur agricole. Elle ne vise pas à proposer un modèle alternatif de production agricole, ni à élaborer de nouveaux instruments politiques ou économiques d'incitation, mais à proposer un nouveau cadre conceptuel permettant de faciliter l'action et plus précisément de soutenir l'innovation. En particulier, la thèse propose de passer d'une problématique de prise en compte des écosystèmes à une problématique de conception des agro-écosystèmes.

b. Questions de recherche

L'agro-écosystème est un objet original du point de vue de sa conception car on ne peut le concevoir et prédire son évolution que partiellement, par contraste avec un objet totalement artificiel. En tant que système de production, il est à concevoir et à gérer, mais en tant qu'écosystème il est doté d'un fonctionnement et de régulations propres, en partie inconnues. Parmi les connaissances nécessaires à la conception d'un agro-écosystème, celles produites par l'écologie sont essentielles car elles visent à comprendre les mécanismes de régulation des écosystèmes. De plus les agro-écosystèmes sont des objets pour lesquels il n'y a pas un concepteur ni un évaluateur donné ni légitime au départ. La prise en compte et la gestion de processus écologiques (*e.g.* préservation de la qualité de l'eau, maintien de la biodiversité) ne peut se faire qu'à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, et requiert une coordination à plus large échelle. Or cette gestion du fonctionnement écosystémique ne relève pas de compétences d'acteurs territoriaux existants. La thèse s'intéresse donc à l'émergence de nouvelles formes d'actions collectives à l'échelle du territoire visant à renouveler la conception et la gestion des agro-écosystèmes.

Nous souhaitons instruire et répondre à deux grandes séries de questions. La première concerne la conception des agro-écosystèmes : comment concevoir un agro-écosystème et qu'est-ce que le concevoir ? Sur quoi doit porter la conception ? Quels sont les raisonnements à mener et les connaissances nécessaires ? La seconde porte sur les conditions et les modalités de la conception d'un agro-écosystème : quels peuvent être les méthodes et outils de conception et de gestion adaptés ? Quels critères d'évaluation développer ? Comment organiser l'action collective, quels modes de gouvernance sont appropriés ?

Chapitre II. Stratégie de recherche

1. Faire converger agronomie et écologie par la conception

La thèse mobilise les sciences de gestion qui, selon David *et al.* (2012), ont pour objet l'action collective. Pour l'analyser, les sciences de gestion prennent en compte conjointement les savoirs et les relations, c'est-à-dire les rationalités et les collectifs. Cette thèse s'intéresse aux raisonnements des acteurs en charge de la production de connaissances sur les écosystèmes et de la conception des systèmes de production agricole. Elle prend en compte également leurs interactions, de manière à éclairer les nouveaux enjeux d'action collective pour soutenir l'innovation dans ce domaine. Plus spécifiquement, la thèse applique les théories de la conception à une analyse de la combinaison potentielle de connaissances en écologie et en agronomie pour l'action. L'agronomie est une discipline relevant de l'ingénierie et de la conception d'objets variés : des organismes aux systèmes de production en passant par divers outils pour les professionnels agricoles. L'écologie, elle, est plutôt une discipline visant à comprendre le fonctionnement des systèmes complexes du vivant. La thèse interroge la possibilité de combiner ces deux disciplines pour identifier de nouvelles solutions visant à surmonter la crise environnementale de l'agriculture.

Les théories de la conception constituent un champ de recherche en plein essor et qui est actuellement en phase de refondation et d'autonomisation (Le Masson *et al.* 2013). Ce champ a pour objectif de définir, spécifier et étudier les raisonnements de conception en les comparant notamment à d'autres types de raisonnements tels que la décision, l'optimisation, la modélisation, la production de connaissances, etc. Les théories de la conception cherchent à développer un langage adapté à ce type de raisonnement complexe. Elles s'intéressent en particulier aux nouveaux objets à concevoir ainsi qu'aux types de connaissances et aux méthodes de production de connaissances nécessaires aux processus de conception (*ibid.*). Selon Hatchuel (2002), la spécificité de la conception est de générer des objets qui n'existaient pas initialement et de garantir au maximum leur existence. Les théories de la conception cherchent donc à rendre compte de la « générativité » (ou capacité de génération d'objets nouveaux) de la conception (Hatchuel *et al.* 2011), en explorant différentes formes possibles au-delà du processus combinatoire, et tout en se démarquant des travaux sur la créativité.

Plus généralement, les théories de la conception cherchent à soutenir de nouvelles formes d'action collective, dans des champs économiques ou professionnels variés confrontés à de forts besoins d'innovation (santé, environnement, nouvelles mobilités, nouvelles formes de

solidarité...). Elles contribuent à favoriser l'émergence de nouvelles méthodes et de formes de collaboration originales, au sein des organisations ou entre elles, et ceci en dialoguant avec d'autres disciplines telles que les sciences de gestion et les sciences de l'ingénieur (Le Masson *et al.* 2013).

Les travaux sur la conception traitent encore peu aujourd'hui des problématiques agricoles et environnementales. Ces problématiques ouvrent pourtant de nouvelles perspectives à ces disciplines. Les agro-écosystèmes soulèvent des questions nouvelles en termes de conception, en raison de leur caractère à la fois vivant et conçu. La conception nous intéresse d'autant plus que nous pensons qu'elle peut permettre de résoudre des situations de blocage de l'innovation voire de conflit, et peut justement tirer parti des différents points de vue et intérêts pour développer des solutions innovantes.

Notre analyse concerne essentiellement les agro-écosystèmes de grandes cultures (céréales et oléo-protéagineux) en France, particulièrement représentatifs du modèle agricole intensif, et largement touchés par les problématiques environnementales exposées précédemment (dégradation des sols, des ressources en eau, de la biodiversité...). De plus la grande culture¹¹ est le type de production dominant en France, notamment par son emprise au sol. Elle occupe près de 15 millions d'hectares, soit plus de la moitié de la superficie agricole utilisée en France métropolitaine, et concerne près des deux tiers des exploitations agricoles (Source : Agreste 2012¹²). Les enjeux d'innovation sont donc particulièrement importants pour les acteurs de ce secteur. Pour les comprendre, nous avons choisi d'analyser en profondeur un cas archétypique de l'agriculture intensive dans lequel un ensemble d'acteurs (économiques et scientifiques) s'investissent collectivement pour engager un processus de conception qui permettrait de concilier production agricole et préservation de l'environnement.

2. La théorie C-K, une théorie de la conception rendant compte de la génération d'objets nouveaux

Parmi les théories de la conception, nous mobilisons dans la thèse la théorie C-K (*Concept-Knowledge*) (Hatchuel and Weil 2003; Hatchuel and Weil 2009), une théorie récente et suffisamment générale et abstraite pour s'appliquer à des domaines variés (Le Masson *et al.* 2013), qui permet de modéliser les raisonnements de conception. La proposition centrale de la théorie C-K est de distinguer formellement :

¹¹ La grande culture comprend les céréales, oléagineux (colza), protéagineux (pois), et quelques légumes (pomme de terre), conduites sur de vastes étendues

¹² <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur283-3.pdf>, Agreste Primeur n°283, juin 2012, consulté en juin 2013

- les « concepts » (C), c'est-à-dire des propositions en partie inconnues, nécessitant un processus de conception. Ces propositions sont dites « indécidables » ; cela signifie qu'on ne peut pas dire qu'elles sont impossibles à réaliser, mais on ne sait pas comment le faire en l'état actuel des connaissances.
- et les « connaissances » (K pour *Knowledge*) contenant des propositions ayant un statut logique, c'est-à-dire dont on sait si elles sont vraies ou fausses. Les connaissances comprennent celles dont les concepteurs disposent déjà ou celles qu'ils acquièrent pendant le processus de conception.

Selon la théorie C-K, le point de départ d'un processus de conception est un « concept » (Hatchuel and Weil 2003). D'un point de vue formel, la théorie impose de travailler simultanément dans les deux espaces (concepts et connaissances) pour formaliser le raisonnement de conception. Cela permet de rendre compte d'un double processus d'expansion : les connaissances permettent de faire émerger de nouveaux concepts et ces derniers entraînent l'expansion des connaissances. C'est l'expansion conjointe de ces deux espaces qui, selon la théorie, permet de générer des objets connus à partir de propositions inconnues.

L'interaction entre l'espace des concepts et l'espace des connaissances est rendue possible par l'application de quatre opérateurs (voir Figure 2):

- $K \rightarrow C$: cet opérateur de disjonction ajoute une propriété de l'espace K comme nouvel attribut d'un concept dans l'espace C. L'opérateur de disjonction permet ainsi de « partitionner » un concept initial.
- $C \rightarrow C$: cet opérateur mobilise les règles de la théorie des ensembles pour opérer des partitions (au sens mathématique). Une partition consiste à diviser un concept en des sous-concepts à l'aide d'un attribut (une proposition de l'espace K).
- $K \rightarrow K$: cet opérateur mobilise les règles classiques de logique (ex. : déduction, test, optimisation...) qui permettent une expansion de l'espace K.
- $C \rightarrow K$: cet opérateur de conjonction vise à obtenir des propositions avec un statut logique. Lorsqu'il y a une conjonction (*i.e.* un concept qui devient une connaissance), le processus de conception s'arrête. Quand il n'y a pas conjonction, il y a développement de nouvelles connaissances. La conception modélise un apprentissage guidé par les choix effectués dans la structuration de l'espace C.

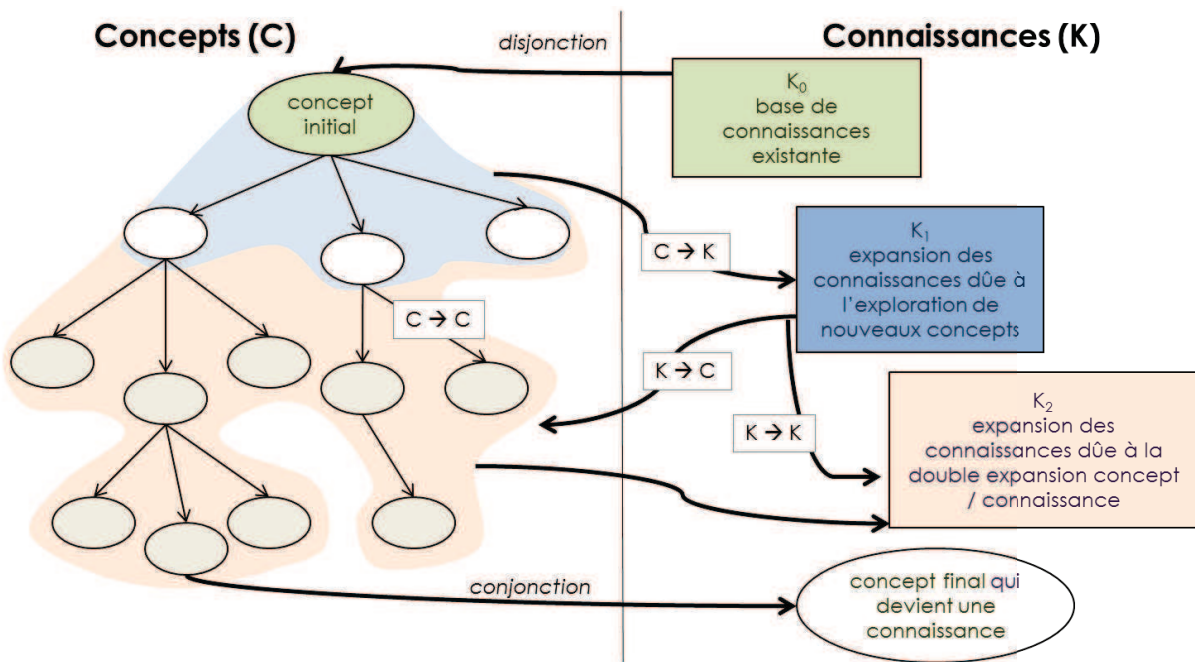


Figure 2 : Formalisme de la théorie C-K.

A partir d'une base de connaissances initiale (K_0 en vert), est opérée une disjonction, *i.e.* la formulation d'un concept initial. Ce concept est ensuite partitionné (en bleu dans l'espace C), ce qui conduit à la production de nouvelles connaissances (K_1 , en bleu), *i.e.* une expansion des connaissances. Ces nouvelles connaissances peuvent à leur tour nourrir (en rose) des partitions dans l'espace C, *i.e.* une expansion des concepts ainsi que la production de nouvelles connaissances, et ce, jusqu'à obtenir une conjonction, *i.e.* le passage de concept à connaissance. Sources : (Hatchuel and Weil 2009; Agogué 2012)

Le formalisme de la théorie C-K permet de cartographier un raisonnement de conception en juxtaposant les concepts et les connaissances (voir Figure 21 et Figure 22). L'espace K permet de faire figurer et d'organiser les connaissances nécessaires à l'élaboration des projets, et l'espace C représente l'arborescence des concepts dans laquelle chaque nœud représente une partition au sens mathématique du terme, réalisée par l'ajout au concept initial d'une propriété issue de l'espace K. La théorie C-K s'appuie sur les résultats des mathématiques modernes (en particulier de la théorie des ensembles) pour développer des perspectives formelles sur les connaissances, la créativité et l'apprentissage (Agogué *et al.* 2013). Son formalisme peut être utilisé pour décrire un raisonnement ex-post ou bien pour élaborer un raisonnement de conception innovante et l'évaluer.

La théorie C-K nous donne des éléments sur l'évaluation de processus de conception innovante (Le Masson *et al.* 2006; Agogué *et al.* 2013) :

- La variété des voies proposées (représentée par une arborescence de concepts dont les branches sont nombreuses),

- La valeur des concepts pour les parties prenantes du champ d'innovation : en conception innovante, c'est l'identification de ce qui fait potentiellement valeur par les parties prenantes, et non des valeurs données de produits connus qui peut être considérée.
- L'originalité des concepts proposés, qui tient au nombre de partitions expansives dans l'arborescence des concepts, *i.e.* celles qui mobilisent des attributs non classiques de la base de connaissances
- La robustesse des concepts et des stratégies d'innovation associées : elle est définie par l'ensemble des connaissances techniques, juridiques, etc. permettant de juger de la maturité des connaissances et de la faisabilité du concept.

Depuis une quinzaine d'années, la théorie a pu être mise en pratique dans une trentaine d'entreprises relevant de domaines variés, tels que les NTIC¹³, l'agro-alimentaire ou l'aéronautique. Les travaux menés en partenariat avec ces entreprises ont permis d'améliorer leurs stratégies d'innovation, l'organisation des équipes d'innovation, le management des recherches ou encore le pilotage de la valeur créée par les projets d'innovation (Agogué *et al.* 2013).

3. Plan de thèse

Notre recherche part d'une interprétation de la crise environnementale de l'agriculture adoptant le point de vue de la conception (Partie 1). Nous développons une analyse généalogique des systèmes de conception dans l'agriculture en nous concentrant sur le cas français. Nous cherchons à comprendre en particulier comment les objets de conception ont progressivement été modifiés en fonction du contexte de la conception et plus généralement de l'agriculture. Nous mettons en évidence que ces objets de conception ont progressivement été confinés et découplés de l'environnement pour pouvoir optimiser la production selon un certain nombre de paramètres. Nous confrontons cette trajectoire avec celle des connaissances en écologie, une discipline qui s'est justement intéressée aux interactions entre les êtres vivants, et avec leur environnement. Cette double approche généalogique vise à mettre en lumière les difficultés rencontrées aujourd'hui pour faire dialoguer ces deux disciplines. Elle souligne également le potentiel d'une telle combinaison de savoirs pour contribuer à surmonter la crise environnementale de l'agriculture. L'agro-écosystème a longtemps été un point aveugle de l'agronomie et de l'écologie. Nous expliquons qu'il est fructueux de le considérer comme un nouvel objet de conception permettant d'intégrer les savoirs en écologie et en agronomie, mais que cela soulève des questions de conception nouvelles.

¹³ NTIC : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Nous analysons ensuite deux champs de la littérature, toujours sous l'angle de la conception, pour comprendre comment les scientifiques traitent aujourd'hui de la prise en compte du fonctionnement des écosystèmes pour repenser les activités humaines (Partie 2). Nous nous appuyons sur les acquis dans deux domaines de recherche au sein d'une vaste littérature : d'une part celui concernant les services écosystémiques¹⁴, et d'autre part celui portant sur les biens communs et la gestion des socio-écosystèmes. Nous avons privilégié deux domaines particuliers, au détriment d'un point de vue plus exhaustif, car ils nous semblent les plus pertinents au regard de notre problématique. La littérature sur les services écosystémiques, en plein essor dans les disciplines de l'écologie, l'agronomie, l'économie et les sciences sociales, conduit à repenser les interactions entre les hommes et les écosystèmes. Elle cherche surtout à mieux prendre en compte les spécificités du fonctionnement des écosystèmes dans les décisions de gestion et les stratégies d'exploitation de ces derniers. Pour reprendre l'analyse d'Hatchuel (2008) sur l'action collective, cette littérature met l'accent sur les nouveaux savoirs à produire pour gérer les écosystèmes. Cependant elle traite peu de la question des relations entre acteurs. Nous avons donc mobilisé un autre champ de la littérature, que déjà un ensemble de recherches récentes (Lant *et al.* 2008; Stallman 2011) a rapproché au premier : la littérature sur les biens communs (Ostrom 1990), qui a été étendue à partir des années 2000 à la gestion des socio-écosystèmes. Cette littérature traite plus spécifiquement que celle sur les services écosystémiques des modes de gouvernance à mettre en place pour pouvoir gérer de façon durable les écosystèmes, au plan environnemental, social et économique. Nous montrons que ces deux domaines de recherche, pourtant fructueux et novateurs, comportent un point aveugle qui concerne la conception des écosystèmes dont on exploite les ressources.

Notre démonstration théorique de l'existence de ce point aveugle est complétée par l'analyse d'une situation observée empiriquement (Partie 3). Dans celle-ci, ce sont les enjeux de préservation de la biodiversité, notamment des oiseaux de plaine, et de la qualité de l'eau qui font l'objet d'une forte mobilisation : d'importants efforts de recherche sont fournis depuis plus de quinze ans sur ces questions et divers instruments de politiques publiques y sont testés et développés. Nous avons suivi dans le cadre de cette étude empirique le montage d'un projet dans lequel sont impliqués un centre de recherche en écologie et une coopérative agricole, deux acteurs qui ont des points de vue très différents sur l'agro-écosystème. Le centre de recherche est doté d'une « Zone Atelier », un dispositif qui lui permet des expérimentations sur l'agro-écosystème à grande échelle et un suivi sur le long terme. La coopérative agricole constitue une interface avec

¹⁴ Une définition générale et largement reprise des services écosystémiques est celle proposée par le Millenium Ecosystem Assessment (2005) : « les bénéfices que les hommes peuvent tirer des écosystèmes ».

plusieurs centaines d'agriculteurs ainsi que des filières agro-alimentaires. Elle cherche à se démarquer de ses concurrents par des initiatives en faveur du développement durable. Le projet suivi dans le cadre de l'étude de cas consiste à mettre en place une filière courte de luzerne¹⁵. Ce projet vise à favoriser l'implantation de prairies dans la plaine de grandes cultures pour rétablir un certain nombre de régulations écologiques. Notre analyse souligne que le principal obstacle à l'innovation est lié au déficit de conception de l'agro-écosystème, la prairie étant considérée comme une solution clé-en-main pour la gestion collective alors qu'il est l'objet à concevoir en commun. Ce cas empirique renforce notre démonstration théorique d'un point aveugle concernant la conception des agro-écosystèmes et permet d'ouvrir des pistes pour y remédier.

L'ensemble de cette analyse nous conduit à élaborer un modèle théorique pour la conception d'un agro-écosystème (Partie 4), avec deux préoccupations. La première est de pouvoir qualifier l'objet à concevoir ; nous le nommons « fonds écologique » et nous le dotons d'une propriété souhaitable, le « sous-jacent ». La seconde est de pouvoir initier un processus collectif de conception impliquant les parties prenantes de l'agro-écosystème ; nous considérerons cet objet à concevoir comme un « inconnu commun » (Le Masson and Weil 2013). Nous commençons par présenter les spécificités d'un raisonnement de conception par comparaison aux raisonnements de modélisation et de décision actuellement mobilisés dans la littérature sur la gestion des écosystèmes. Ensuite nous montrons la direction à prendre pour qualifier ce qui peut faire l'objet de la conception, et montrons les apports de l'économiste Georgescu-Roegen (1971) sur cette question en analysant son modèle « fonds-flux ». Finalement, nous exposons notre propre modèle théorique qui permet de qualifier un agro-écosystème et d'outiller les processus de gouvernance pour en soutenir la conception. Notre recherche met en évidence les nouveaux enjeux de gouvernance et les défis managériaux soulevés par le fait de considérer le fonds écologique comme un inconnu commun et non comme un bien commun. Elle ouvre de nouvelles perspectives sur le pilotage des processus d'innovation dans le secteur agricole, en s'appuyant sur la notion de « collègues de l'inconnu », une forme managériale qualifiée par Le Masson et Weil visant à surmonter les blocages de l'innovation (Le Masson *et al.* 2012b). Cette analyse nous conduit à identifier de nouvelles perspectives concernant les politiques publiques et la recherche en vue d'améliorer la durabilité des agro-écosystèmes.

¹⁵ Voir quelques caractéristiques de la luzerne en Annexe 1

Partie 1 : Relire la crise environnementale de l'agriculture : agronomie et écologie, une convergence impossible ?

Introduction de la Partie 1

Nous retraçons ici la généalogie des systèmes de conception en agriculture et en agronomie, depuis leur origine jusqu'à nos jours. La perspective est de montrer que la crise des savoirs sur les processus écologiques et la crise de l'innovation constituent une dimension importante de la crise environnementale de l'agriculture. A partir d'une histoire des connaissances en agronomie et d'une d'histoire des techniques (que nous ne prétendons pas enrichir ici ; on peut utilement se référer à Boulaine (1996), nous mettons en évidence, pour chaque grande période du développement de l'agriculture, les objets sur lesquels portaient la conception. Nous nous intéressons notamment aux types d'objets (procédés, techniques, organismes vivants...) et à leur échelle (plante, parcelle, exploitation, territoire...), aux acteurs et organisations impliqués, aux types de connaissances mobilisées, aux raisonnements de conception et aux logiques de performance à l'œuvre. La conception a toujours été présente au cours de l'histoire de l'agriculture, mais elle est rarement explicitée. Elle présente de nombreuses particularités qui la différencient notamment de la conception industrielle, aujourd'hui plus étudiée (voir les travaux publiés dans les différentes revues du domaine, telles que *Journal of Product Innovation Management*, *Research in Engineering Design*, *Journal of Engineering Design*...).

Nous confrontons ensuite cette généalogie de la conception en agronomie aux progrès des connaissances en écologie. Cette discipline a proposé des modélisations variées des processus écologiques de manière à comprendre le fonctionnement du vivant. Elle a mis en évidence et produit des connaissances fines de ces processus, qui pour un certain nombre ont été négligés dans les raisonnements de conception de l'agronomie. Pourtant, malgré le progrès des connaissances qui aident à surmonter ce que l'on pourrait qualifier de crise des savoirs de l'agronomie, il semble aujourd'hui difficile de comprendre comment agir sur les systèmes vivants. On passe en quelque sorte d'une crise des savoirs à une crise de l'action.

A partir des années 1980, de nouveaux travaux de recherche en agronomie et en écologie ont ouvert des voies pour surmonter ces difficultés et rapprocher ces deux disciplines qui se sont longtemps ignorées. Un concept nouveau a été introduit, celui d'agro-écosystème. Nous montrons quels sont, selon nous, les potentialités d'un tel concept, mais aussi les difficultés qu'il

pose aujourd'hui pour la mise en œuvre d'actions visant à concilier production agricole et protection de l'environnement.

Chapitre I. La conception agricole, une trajectoire qui s'affranchit des contingences de l'environnement

La trajectoire de l'agriculture s'est construite de façon progressive, non linéaire et des avancées foisonnantes se sont parfois entrecroisées, si bien que la reconstitution que nous en présentons ici est simplifiée et non exhaustive. De plus, elle porte essentiellement sur les productions végétales en France. Notre analyse s'appuie principalement sur les ouvrages d'histoire de l'agriculture et de l'agronomie que sont ceux de Boulaine (1996), Mazoyer and Roudart (2002) et Robin *et al.* (2007).

1. Optimiser la production : un rétrécissement progressif des objets de la conception

a. De la préhistoire au XVIIIe siècle, des objets de conception à grande échelle et collectifs

L'agriculture apparaît il y a environ 10 000 ans, au Néolithique. Avant cela, les hommes vivent de la chasse, pêche et cueillette, c'est-à-dire du prélèvement de ressources dans les écosystèmes. On ne peut alors réellement parler de conception, mais on peut raisonnablement supposer que les chasseurs-cueilleurs ont appris de façon empirique à limiter leur prélèvement de manière à assurer la capacité de régénération de l'écosystème. Les populations sont alors généralement migratrices ; elles exploitent un territoire durant une période donnée puis se déplacent, et ne reviennent qu'après une période de régénération du milieu suffisamment longue. Progressivement, les formes d'action collective et les techniques (pièges, armes, etc.) se perfectionnent, notamment pour la chasse, de façon à augmenter les quantités prélevées tout en diminuant l'effort fourni (Mazoyer and Roudart 2002). Certains auteurs avancent que durant le Néolithique, les hommes ont atteint dans certaines régions la capacité des écosystèmes à leur fournir des moyens de subsistance (« *carrying capacity* »), ce qui aurait motivé la naissance de l'agriculture ; d'autres expliquent que ce phénomène a été rendu possible par un perfectionnement des techniques et la capacité des hommes à inventer et mettre au point une diversité de systèmes de culture et d'élevage (Mazoyer and Roudart 2002).

L'agriculture a toujours été une action de domestication de la nature. Toutefois les rapports que l'homme entretient avec la nature pour produire des biens de subsistance ont été grandement modifiés à travers le temps. L'objectif de l'agriculture est dès ses débuts d'augmenter la production d'aliments par rapport à ce que fournissent naturellement les écosystèmes dans lesquels les hommes vivent. Ainsi les premiers peuples pratiquant l'agriculture sélectionnent des plantes et des animaux, sèment les premières et élèvent les seconds en vue de les multiplier et d'en utiliser les produits. Les activités fondamentales de cette domestication sont la sélection et la transformation des milieux. Cette transformation des milieux vise essentiellement à gérer la fertilité des sols mais aussi à lutter contre les parasites et les adventices¹⁶.

Les premiers agriculteurs pratiquent l'abattis-brûlis, c'est-à-dire qu'ils défrichent puis brûlent des parcelles de forêt de manière à y cultiver des plantes comestibles une ou deux années (Mazoyer and Roudart 2002). Les cultivateurs défrichent donc chaque année une nouvelle parcelle dans la forêt. Cette technique leur permet de bénéficier de la fertilité des sols entretenue par les cycles de la végétation dans la forêt. On parle de fertilisation verticale : les arbres puisent des minéraux profondément dans le sol qui sont ramenés à la surface par la chute des feuilles ou par l'abattis-brûlis. La conception d'un tel système est donc basée sur la capacité à maintenir la fertilité du sol et à limiter le développement des adventices en utilisant au mieux les processus écologiques de la forêt, ce qui permet de limiter le travail humain. C'est la durée de la « jachère forestière » qui permet de piloter ces propriétés en permettant une régénération plus ou moins longue des processus écologiques. La forêt dans son ensemble est intégrée au raisonnement de conception, qui par ailleurs porte sur des échelles de temps long (10 à 50 ans). Dans ce système, la forêt n'est pas appropriée individuellement ; en revanche la récolte d'une parcelle revient à la famille qui l'a défrichée et mise en culture (*ibid.*).

Sous nos latitudes, où les forêts sont moins productives que les forêts tropicales, l'augmentation de la population, et par conséquent l'accélération des cycles d'abattis-brûlis accompagné d'une diminution de la durée des jachères forestières, conduisent à une déforestation massive. Dès l'Antiquité, l'homme doit abandonner ce système de production au profit d'un système de culture avec jachère herbacée et élevage associé (Mazoyer and Roudart 2002). Ce système, qui perdure jusqu'au XVIII^e siècle, est fondé sur une organisation d'un territoire en trois parties, l'*ager* (terres cultivées en céréales et jachère), le *saltus* (espace pâturé par le bétail) et la *silva* (la forêt qui fournit

¹⁶ Une adventice est une espèce végétale qui s'ajoute à un peuplement auquel elle est étrangère. Certaines adventices ont été introduites de régions éloignées, d'autres sont issues de milieux différents dans la même région. La plupart sont des mauvaises herbes, c'est-à-dire, selon la définition de l'Afnor, des plantes indésirables là où elles se trouvent. Les deux termes ont aujourd'hui tendance à devenir synonymes dans le milieu agricole. (*Larousse Agricole 2002*)

le bois et d'autres ressources). Le système de culture est généralement organisé de façon biennale, avec une culture sur un peu moins d'un an puis une jachère de un à deux ans. La jachère consiste en une friche herbeuse non ensemencée et soumise au pâturage. Toutefois, contrairement aux idées reçues, cette terre n'est pas mise au repos : elle est labourée à bras avec la houe et la bêche, puis ce travail du sol est complété par le passage de l'araire qui sert à détruire les mauvaises herbes (*ibid.*). Le pâturage du bétail sur le *saltus* le jour, puis sur la jachère la nuit, permet un transfert latéral de fertilité grâce au bétail du *saltus* vers l'*ager*, ce qui permet de reconstituer partiellement les réserves nutritives du sol cultivé. Ce système de jachère entretenue permet aussi de limiter le développement d'adventices.

La gestion de ce système dépend des variables que sont le rapport des surfaces de ses trois composants (*ager*, *saltus*, *sylva*) et le nombre de bêtes réalisant le transfert de fertilité et la force de travail. Sa conception porte sur un territoire relativement étendu, pour partie géré par une communauté: l'*ager* est généralement privatisé, mais le pâturage est conduit collectivement, les troupeaux étant souvent regroupés, et le *saltus* et la *sylva* étant le plus souvent des communaux. A partir du XI^e siècle se développent des systèmes à culture attelée lourde dans les zones tempérées froides : de nouveaux outils et techniques sont mis au point, tels que la charrue à soc permettant de faciliter le labour, la faux permettant de faire du foin, la stabulation où est concentré le bétail, ce qui permet de mieux récupérer les déjections notamment sous forme de fumier, et la charrette permettant de faciliter les transferts de fertilité de la stabulation au champ (Mazoyer and Roudart 2002). Ces avancées techniques permettent une expansion démographique sans précédent pendant trois siècles. Mais alors que le système de production avec jachère et élevage associé perdure jusqu'au XVIII^e siècle, les crises de production deviennent de plus en plus fréquentes. La performance de ce système est en effet limitée par l'insuffisance des restitutions d'éléments nutritifs, donc les problèmes d'appauvrissement et d'érosion des sols, des limites accentuées par la sécheresse en région méditerranéenne et le froid dans les régions situées plus au Nord (*ibid.*).

Les systèmes d'abattis-brûlis comme les systèmes à jachère reposent sur le principe de régénération des écosystèmes, et en particulier de la fertilité des sols. Ces systèmes de production sont donc dépendants du bon fonctionnement écologique des milieux cultivés. Toutefois leur productivité est limitée, notamment car ils ne permettent pas une reconstitution suffisante des réserves nutritives du sol. Ainsi, face à l'augmentation de la population humaine, la multiplication des crises nécessite de trouver des solutions pour augmenter la production agricole. Une première voie est de mettre en culture toujours plus de surfaces (voir Figure 3, partie gauche), notamment par le défrichement, l'assèchement de marais ou l'exploitation des landes. Mais à partir du XVIII^e

siècle, le défrichement rencontre ses limites, l'extension des surfaces cultivées étant de plus en plus difficile. En outre, il faut garder des forêts pour le bois d'œuvre (notamment pour la construction navale), le bois de chauffe, la chasse, etc. Une autre voie, qui se développe avec les premières grandes explorations, notamment la découverte de l'Amérique, est d'introduire en Europe de nouvelles cultures, telles que la pomme de terre, le maïs ou la tomate. L'objectif est de diversifier la production quasi-exclusive de céréales dont les rendements sont faibles : autour de 8 à 9 q/ha jusqu'en 1850, soit une productivité à peine doublée en près de 10 000 ans (Feyt 2007). En raison des contraintes culturelles auxquelles sont soumis les paysans (les nobles et le clergé perçoivent des impôts sur les céréales), ces nouvelles cultures sont longtemps confinées dans les jardins (Boulaine 1996). Les efforts de Parmentier pour développer la production de pomme de terre en France à la fin du XVIIIe siècle témoignent des nombreux obstacles à surmonter pour bouleverser le système d'organisation alors en place dans les campagnes françaises. Une troisième voie poursuivie est d'augmenter la production agricole par unité de surface, donc d'intensifier la production (Figure 3, branches de droite). C'est ce qui fait l'objet de nombreux efforts de conception jusqu'au XXe siècle.

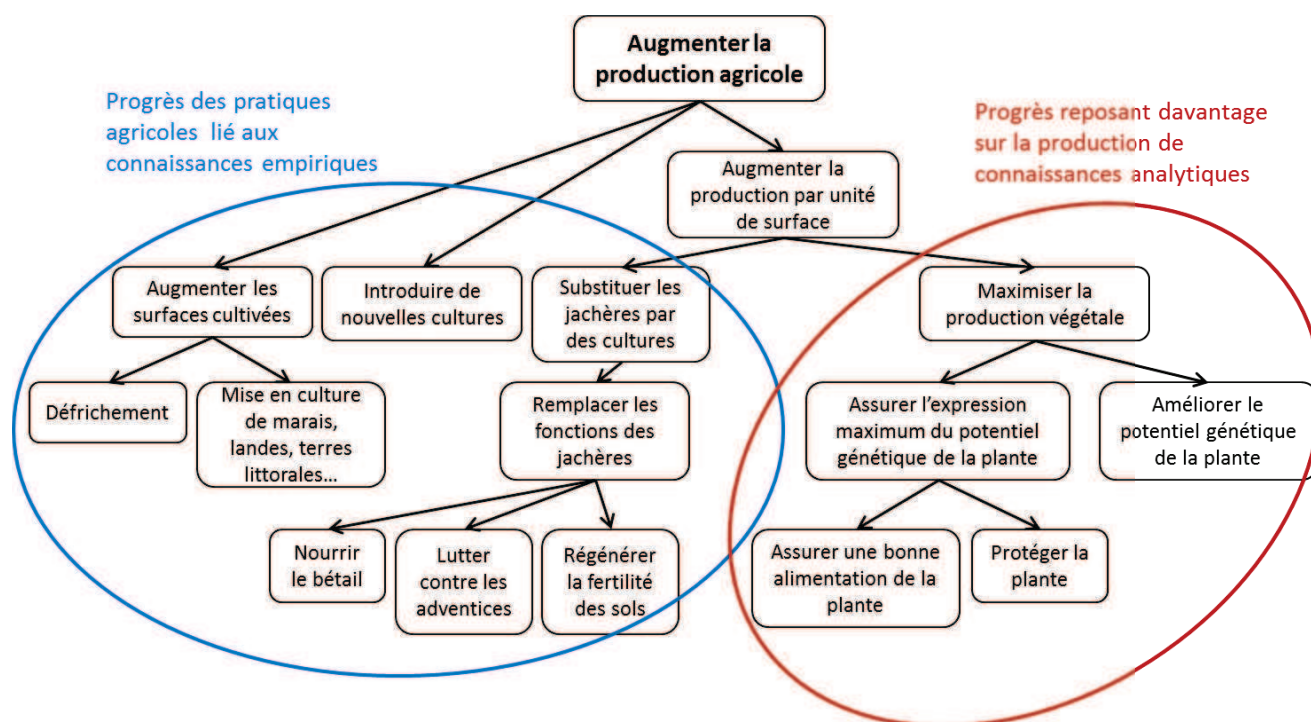


Figure 3 : Les différentes voies envisagées pour augmenter la production agricole en France au cours de l'histoire

b. La suppression de la jachère à partir de la fin du XVIIIe siècle, une révolution ouvrant la voie de l'intensification agricole à l'échelle de la parcelle

La suppression de la jachère, un enjeu de substitution de fonctions écologiques par la technique

Dès la fin du Moyen-âge, avec l'augmentation progressive de la population, les systèmes avec jachère dans lesquels chaque année près de la moitié des terres n'est pas exploitée sont considérés comme n'étant plus tenables. Toutefois supprimer la jachère nécessite de substituer ses fonctions par d'autres techniques (voir Figure 3), ce qui constitue une rupture majeure du point de vue des interactions entre l'homme et les écosystèmes cultivés. La jachère permet à différents cycles écologiques de se reconstituer sur une à deux années. En la supprimant, l'homme cherche à substituer aux cycles écologiques des techniques nouvelles ou des intrants, qui au fur et à mesure des progrès des connaissances et du développement industriel, deviendront pour la plupart manufacturés. On assiste donc dès le XVIIIe siècle à une artificialisation des milieux cultivés, qui va grandement s'accélérer à partir de la seconde guerre mondiale.

Les premières étapes de la suppression de la jachère consistent à développer de nouvelles cultures qui contribuent au renouvellement de la fertilité et à la lutte contre les mauvaises herbes : c'est le cas des plantes sarclées fourragères comme les navets, qui permettent de nourrir des animaux et nécessitent des désherbages fréquents (Mazoyer and Roudart 2002). C'est aussi le cas des prairies temporaires, notamment des légumineuses qui enrichissent le sol en azote. La conception n'est plus pensée à l'échelle d'un territoire composé de l'*ager*, le *saltus* et la *silva*, mais davantage à l'échelle d'une exploitation agricole, avec la complémentarité élevage-cultures, voire à celle de la parcelle. La conception est pensée à l'échelle temporelle de la rotation, celle-ci devenant généralement plus longue et plus diversifiée que dans les systèmes avec jachère. Le transfert de la fertilité ne se fait plus seulement horizontalement comme dans le système à jachère et élevage associé, mais aussi dans le temps. Ce transfert de fertilité dans le temps est maintenant opéré par deux mécanismes : les épandages de fumier sur certaines cultures ainsi que les légumineuses qui fixent de l'azote et en lèguent à la culture suivante. Les décisions de gestion sont prises individuellement, la gestion de la fertilité n'étant plus collective mais sous la responsabilité de l'exploitant.

La suppression progressive de la jachère est considérée par les historiens et les agronomes comme une révolution agricole majeure, qui permet d'augmenter la biomasse produite et recyclée, notamment car elle rend possible l'augmentation du cheptel donc de la production de fumier nécessaire à la fertilisation des sols (*ibid.*). Cette révolution va conduire à une intensification des

pratiques rendue possible par une évolution rapide des connaissances et des techniques, mais aussi par un contexte socio-économique favorable.

La levée des contraintes socio-économiques pour le développement d'un nouveau système de production agricole

La suppression des jachères et le développement des prairies temporaires de légumineuses n'a pas été facile à mettre en place. Olivier de Serres mentionne déjà l'intérêt de ces techniques dans son traité¹⁷ fondateur paru en 1600, mais il faut attendre la Révolution Française pour que le nouveau système de production agricole puisse se diffuser. Au XVIIIe siècle des intellectuels identifient de nombreux obstacles à la suppression des jachères : notamment le système de vaine pâture qui stipule qu'une fois la récolte achevée les animaux ont accès aux parcelles pour y consommer les résidus de culture, les baux à court terme qui n'incitent pas les paysans à maintenir la fertilité de leurs sols, l'assolement obligatoire¹⁸ qui interdit la mise en culture de plantes pluriannuelles et le poids des impôts qui empêchent les paysans d'investir dans de nouvelles techniques (Boulaine 1996).

La Révolution de 1789 va permettre de grandes mutations sur le plan agricole. Les progrès techniques, jusque-là au stade de propositions vont désormais pouvoir être appliqués. Après la nuit du 4 août et l'abolition des droits féodaux, la Société d'Agriculture remet un mémoire à l'Assemblée Nationale comportant l'abolition du droit de parcours, le partage des communaux, l'assèchement des marais, l'allongement des baux ruraux, l'allègement des impôts, l'unification des poids et mesures, la vente des terres de la nation, etc. (Boulaine 1996). Les contraintes d'ordre économique et social étant levées, la transition se met en place, et à la fin du XIXe siècle, 75% des jachères sont mises en culture. En un siècle, la production de céréales a doublé et la production de viande a été multipliée par trois (Toutain 1971). Grâce à cette révolution agricole, l'agriculture fournit à l'industrie naissante des matières premières, de la main-d'œuvre, des vivres en quantité suffisante et des capitaux ; et en retour elle devient un débouché pour les produits de l'industrie (Mazoyer and Roudart 2002).

La naissance d'une science de l'agriculture au XVIIIe siècle

La période qui s'étend du Néolithique au milieu du XVIIIe siècle est marquée par une production de connaissances résultant essentiellement de démarches empiriques et dont la capitalisation est assez faible. Quelques savants observent les pratiques et techniques agricoles et compilent les faits en vue d'énoncer des recettes pour l'action. Les ouvrages les plus anciens qui témoignent de

¹⁷ Théâtre d'Agriculture et Mesnage des Champs

¹⁸ Les paysans devaient se conformer à la rotation biennale puis triennale et organiser les parcelles de manière à regrouper les jachères pour permettre le pâturage collectif.

cette démarche sont ceux de Xénophon décrivant les techniques agricoles de la Grèce antique quatre siècles avant notre ère, ou encore ceux de Columelle pour les pratiques agricoles romaines (Boulaine 1996). Ces démarches d'observation sont reprises par des agronomes arabes aux XI^e et XII^e s. en Andalousie, qui les enrichissent par des études comparées de situations culturelles contrastées ainsi que par quelques expérimentations sur le travail du sol ou de l'irrigation. Selon Jouve (2007), cette première tentative de réflexion scientifique sur l'agriculture s'arrête avec la reconquête du Sud de l'Espagne, et ne reprend qu'au XVI^e siècle, avec Alonso de Herrera puis Olivier de Serres.

A partir du XVIII^e siècle et jusqu'au XX^e siècle, l'activité agricole est marquée par une rationalisation des pratiques et une capitalisation accrue des connaissances. A travers l'Europe, les savants commencent à s'intéresser à l'agriculture et structurent peu à peu de nouveaux modes de production des connaissances. Les inventaires de pratiques agricoles laissent place à la production de connaissances théoriques et analytiques¹⁹. Au cours de la première moitié du XVIII^e siècle se mobilisent des « auteurs ruraux », personnalités lettrées des campagnes, puis des savants, appelés parfois « physiciens agriculteurs » ou « agriculteurs », qui associent à l'étude des phénomènes de la nature celle des savoirs et pratiques paysans. L'historien Denis (2007) souligne les éléments de contexte suivants pour aider à comprendre la naissance de cet effort collectif pour le progrès de l'agriculture : l'idéologie de la science « utile » ; le fait que les méthodes telles que l'observation ou l'expérimentation soient considérées comme les moyens les plus adéquats pour comprendre et maîtriser la nature ; la considération de l'agriculture par les Physiocrates comme fondement essentiel de l'économie, et le mouvement des Lumières en faveur de l'émancipation des individus.

Les auteurs ruraux et physiciens agriculteurs veulent que savants, fermiers et amateurs de l'agriculture se rencontrent de la même manière que Diderot en appelle à la rencontre des académiciens, amateurs, artisans et ouvriers (Denis 2007). Mais un problème se pose : il n'y a pas de « science de l'agriculture » ; il n'existe ni formation, ni statut de savant spécialisé en agriculture. Ainsi, les débuts d'une structuration de la réflexion dans le domaine de l'agriculture sont difficiles. Progressivement, la mobilisation croissante de savants et de personnalités influentes au plan politique permet la montée en puissance de cette « science de l'agriculture » et des institutions nécessaires à son développement. A la fin des années 1750 sont créées les premières Sociétés d'Agriculture en France, d'abord régionales et portant sur les domaines techniques pour ne pas gêner l'action administrative ; puis en 1788 est créée la Société Royale d'Agronomie (Boulaine 1996).

¹⁹ Connaissances dont la création est basée sur un processus cognitif et rationnel fondé sur l'abstraction, la construction de théorie ou l'expérimentation

Les physiiciens agriculteurs mènent leurs observations, élaborent des expériences et testent des innovations sur des domaines agricoles expérimentaux, comme Olivier de Serres le faisait au Pradel, ce qui leur permet de garder l'exploitation agricole comme échelle d'observation : c'est le cas de Duhamel du Monceau à Denainvilliers, Lavoisier à Fréchines ou encore Boussiaingault à Bechelbronne. Parallèlement, le laboratoire devient un nouveau lieu de production de connaissances pour l'agriculture, notamment avec le développement de recherches analytiques en chimie organique, en physique et en biologie. L'objet de conception est alors ciblé au niveau de l'organisme que ce soit la plante ou l'animal. Ainsi les nouveaux modes de production des connaissances vont influencer la représentation des objets de la conception agricole, celle-ci étant de plus en plus focalisée sur la plante ou l'animal, le milieu étant considéré comme exogène. Le modèle « sol-plante-atmosphère » devient d'ailleurs structurant pour étudier les processus de nutrition des plantes.

Développement de connaissances et multiplication des pistes d'exploration pour augmenter la production agricole

- *La nutrition végétale*

Des débats sont lancés sur la nature de la « science de l'agriculture » dès la fin du XVIII^e siècle : d'un côté ce sont les chimistes qui revendiquent cette discipline, d'un autre les naturalistes tels que Linné. Le débat se poursuit au XIX^e siècle : les naturalistes travaillent sur l'acclimatation des espèces étrangères intéressantes économiquement, ou sur la création de nouvelles variétés ou races par l'hybridation et la sélection. Les chimistes tels que Liebig estiment pour leur part que la science des engrais constitue l'essentiel de la « science de l'agriculture ». Par ailleurs certains savants défendent l'idée d'une discipline qui intégrerait l'étude des processus physico-chimiques et socio-économiques. Ainsi Duhamel du Monceau définit en 1771 la science de l'agriculture comme une « science qui nous apprend à cultiver les terres pour en tirer tout le produit possible » (Denis 2007). Ces débats sont assez représentatifs du foisonnement, mais aussi des divergences des théories et des approches développées pour tenter d'augmenter la productivité de l'agriculture. Le débat structurant la science de l'agriculture au XIX^e s. concerne l'opposition entre la nutrition organique et la nutrition minérale des plantes, la seconde prenant progressivement l'ascendant sur la première, ce qui annonce la trajectoire de la modernisation agricole au XX^e siècle.

Au début du XVIII^e siècle, alors que les sols s'appauvrissent en raison de trop faibles restitutions, certains savants estiment qu'une solution au problème de nutrition des plantes cultivées est le travail du sol. Ainsi l'auteur britannique Tull explique dans son ouvrage de 1731 que la pulvérisation du sol, qui permet d'augmenter la surface de contact entre le sol et la plante, peut

favoriser la mise à disposition des éléments nutritifs pour la plante et même remplacer une fertilisation correcte. Il ne considère donc pas que le stock d'éléments nutritifs dans le sol soit limité (Boulaine 1996). Duhamel du Monceau, qui s'appuie sur cet ouvrage pour publier les six tomes du *Traité de la culture des terres* de 1750 à 1761, préconise cependant l'utilisation de fumier et s'intéresse à différents résidus et minerais pour la nutrition végétale. Le fumier est en effet l'engrais par excellence aux XVIII^e et XIX^e siècles, mais il est produit en quantité insuffisante. Diverses solutions sont alors explorées pour tenter d'enrichir le sol de manière à augmenter les rendements : guano importé du Chili et du Pérou, cendres, poudrettes, éléments animaux (sang, cornes, os...), chaux pour améliorer la structure des sols... (*ibid.*) Cependant progressivement les inégalités se creusent entre ceux qui peuvent acheter de la matière organique pour fertiliser leurs terres et ceux qui sont contraints de la vendre pour subsister. Ce déficit en fertilisants associé à un partage inégal des communaux contribue à la disparition de nombreuses petites exploitations au cours du XVIII^e siècle.

Divers savants défendent l'idée que les plantes se nourrissent uniquement de l'humus, produit de leur décomposition. L'Allemand Thaer publie ainsi en 1809 une théorie de l'humus dans laquelle il soutient que le carbone est dilué dans des solutions nutritives issues de la dégradation des végétaux (notion de suc nourricier). L'idée que les plantes ne se nourrissent que de matière organique ne sera pas vraiment remise en question avant la publication des travaux de l'allemand Justus Liebig en 1840 présentant la théorie de la nutrition minérale. On peut toutefois signaler quelques précurseurs de cette dernière: dès le XVI^e siècle, Palissy soulignait la nécessité de restituer au sol les matières minérales enlevées par les récoltes. Il écrivait en 1563 que la valeur du fumier résidait essentiellement dans sa teneur en sels minéraux. Glauber, chimiste allemand du XVII^e siècle s'intéressant aux sels, découvre leur action fertilisante (Boulaine 1996). Saussure (1767-1845), père de la physiologie végétale, met en évidence le rôle des éléments minéraux dans l'alimentation des plantes et jette les bases de la compréhension de la photosynthèse, montrant que les plantes captent le carbone de l'air (*Recherches chimiques sur la végétation* – 1804). Enfin, le chimiste Lavoisier, qui met en pratique les travaux de Duhamel du Monceau sur sa propre exploitation agricole, mène un suivi précis des productions et établit des bilans économiques à l'échelle des ateliers de production comme de l'exploitation entière. Il cherche notamment à augmenter le cheptel pour améliorer les apports de fumier et à introduire des légumineuses dans les rotations. Il tente d'appliquer la technique du bilan, mais sans réel succès. Toutefois, il rédige anonymement un programme de recherche que l'Académie des sciences aurait dû proposer au concours en 1794, mais qui ne le sera pas car Lavoisier est arrêté puis guillotiné en 1793. Ce programme de recherche décrit le cycle des composants de la matière à la surface de la terre (le

cycle réduction-oxydation) et oppose la « végétalisation » (la photosynthèse) à la combustion et aux fermentations. Lavoisier résume ainsi cette « merveilleuse circulation entre les trois règnes » : « Les végétaux puisent dans l'air qui les environne, dans l'eau et en général dans le règne minéral, les matériaux nécessaires à leur organisation. Les animaux se nourrissent ou de végétaux, ou d'autres animaux, qui ont été eux-mêmes nourris de végétaux ; en sorte que les matériaux dont ils sont formés sont toujours, en dernier résultat, tirés de l'air ou du règne minéral. Enfin la fermentation, la putréfaction et la combustion rendent continuellement à l'air de l'atmosphère et au règne minéral les principes que les végétaux et les animaux en ont empruntés. » Liebig (1803-1872) s'appuie notamment sur les travaux de Lavoisier pour établir le lien entre la matière minérale et la matière organique : il affirme que les plantes absorbent des éléments chimiques sous forme de composés simples pour produire de la matière organique. Il estime par conséquent qu'il est possible de fournir aux plantes des substances nutritives sous forme de sels minéraux et que le fumier n'est pas indispensable.

Son contemporain Boussingault (1802-1887) souligne comme Liebig la nécessité de compenser les exportations minérales dues à la production agricole. Toutefois il ne se risque pas à affirmer que seuls les engrais chimiques suffisent et défend plutôt la fertilisation par l'humus. Boussingault s'oppose à Liebig sur la question de la nutrition azotée (Liebig pensait alors que l'azote était fixé par les feuilles des plantes comme le carbone), et démontre que les plantes consomment l'azote du sol et non de l'air. Son livre, *Économie rurale* paru en 1843, consacre sa réputation. Il rassemble ensuite ses travaux sur la chimie agricole sous le titre *Agronomie, chimie agricole et physiologie*, dont huit volumes sont publiés entre 1860 et 1891, très vite traduits en anglais et en allemand. Soulignons que les deux savants, bien qu'opposés sur de nombreux sujets, se préoccupent tous deux de l'appauvrissement des sols accentué par des visions à court terme (Blondel-Mégrelis 2007). Ainsi Liebig écrit en 1862 « l'homme n'a pas le droit de disposer de ce que le sol cache en son sein. C'est le bien des générations futures ».

Désormais l'agronomie devient extrêmement liée aux sciences fondamentales que sont la chimie et la physique. La fertilisation minérale devient un nouvel objet de conception. La façon de produire les connaissances change : des expériences « cernées » permettent de mettre en évidence les mécanismes et les causalités (Boulaine 1996). Ainsi l'essor de la chimie et de la physiologie végétale permet progressivement aux savants de répondre aux questions suivantes : quels sont les éléments constitutifs de l'air, du sol et de la plante ? Et sous quelle forme sont-ils assimilés ? Les travaux permettent de mettre au point des méthodes de fertilisation minérale basée sur des bilans entrée-sortie au niveau de la parcelle, tout en laissant les questions sur le transfert des flux entre

les différents compartiments du vivant ouvertes. Pourquoi par exemple les plantes absorbent-elles l'azote du sol et non de l'air alors que celui-ci est plus riche en azote ? Cependant ce confinement et ce resserrement des objets d'étude et de conception conduit à fabriquer une « scène » de plus en plus simplifiée, dans laquelle par exemple les sols sont essentiellement décrits par leur teneur en engrais. Ceci permet de produire des connaissances plus faciles à partager et à diffuser, mais conduit à concentrer les efforts de conception sur certains paramètres en s'affranchissant des autres, si bien que l'on perd de vue le caractère vivant des objets.

Pasteur suggère à Boussingault d'explorer l'approche « bactérienne » plutôt que les voies physiques pour comprendre les liens entre l'azote de l'air et l'azote du sol. Mais c'est en 1877 que Schloesing et Muntz orientent réellement les recherches vers le monde vivant du sol. Berthelot découvre peu à peu le rôle des bactéries dans la fixation de l'azote, puis Hellriegel met en évidence le rôle des légumineuses et leur pouvoir fixatif d'azote par association avec des bactéries du sol (Boulaine, 1996). La biogéochimie se développe alors, et contrairement aux approches chimiques pures, ne considère pas les systèmes cultivés comme des systèmes clos. Les biogéochimistes prennent en compte les phénomènes de lixiviation des minéraux et les apports latéraux d'éléments par le ruissellement. Par la suite, la pédologie se développe avec l'étude des interactions entre le sol, la faune, la rhizosphère, l'air, la végétation aérienne, la roche mère et l'eau (Pédro 2007).

Les engrais organiques restent majoritaires à la fin du XIXe siècle. L'augmentation du cheptel permet de mieux répondre aux besoins en fumier. Mais l'utilisation des engrais minéraux va progressivement augmenter. Dès 1840 l'intérêt de l'épandage de phosphates pour la fertilisation végétale est mis en évidence et diffusé en Angleterre. Des os calcinés sont épandus dans les champs, puis des usines de production de superphosphates sont créées. Ces derniers sont diffusés rapidement en Allemagne mais beaucoup plus tardivement en France (à partir de 1870). Finalement, les travaux de Dehérain, Ville et les expériences menées en Angleterre et en Allemagne convainquent de plus en plus de l'intérêt d'adopter les engrais chimiques (Boulaine 1996). Des usines de superphosphates sont alors créées en France, et la découverte de gisements de phosphore en France et en Afrique du Nord fait peu à peu décoller le marché des engrais industriels.

La Figure 4 reprend l'ensemble des voies que nous avons mentionnées et qui ont été explorées au cours de l'histoire de l'agriculture pour améliorer la nutrition des plantes cultivées.

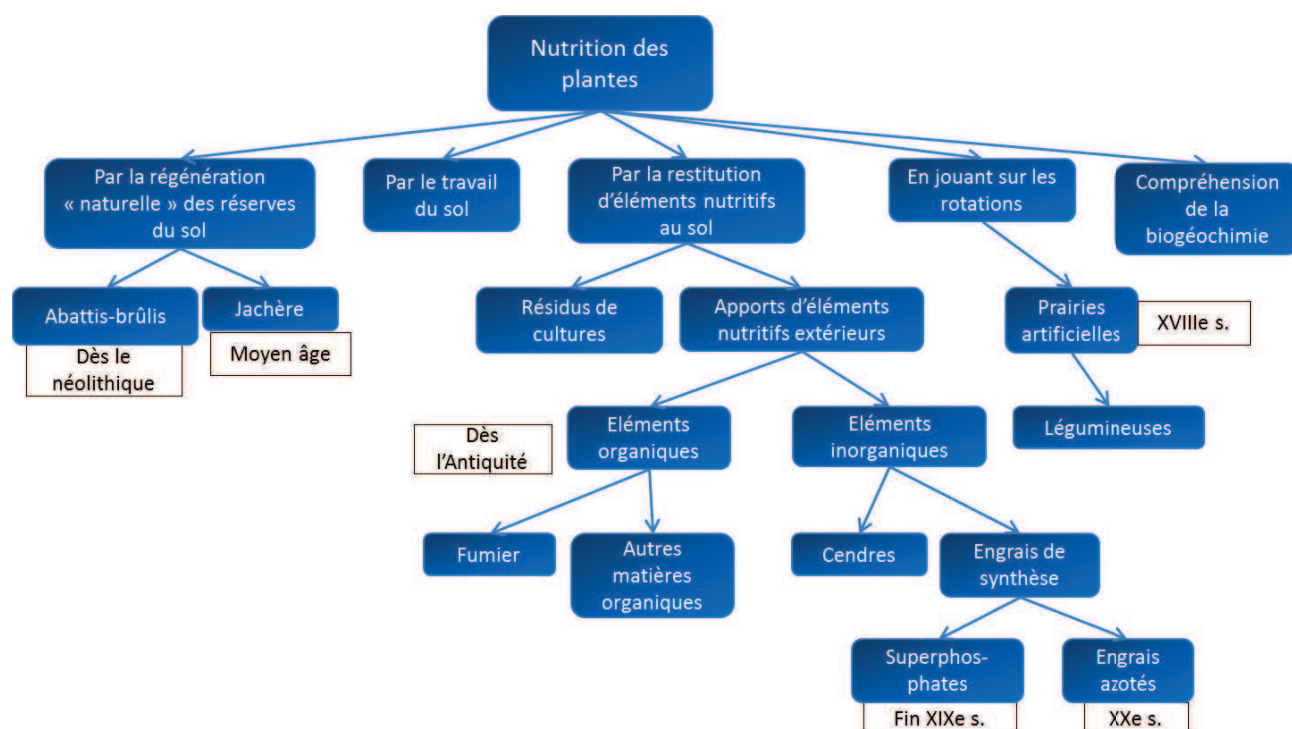


Figure 4 : Récapitulatif des différentes voies explorées pour améliorer la nutrition végétale du Néolithique au XXe siècle. (Cette figure n'est pas chronologique mais indique quelques repères temporels)

Il faut souligner que si la nutrition végétale a mobilisé l'attention de nombreux savants aux XVIIIe et XIXe siècles, deux autres domaines de la « science agricole » ont fait l'objet de recherches et de progrès afin de contribuer à l'amélioration des rendements : il s'agit de la sélection des espèces et de leur protection sanitaire, dont nous allons présenter brièvement les principales avancées. Pour augmenter la production végétale, il est en effet possible soit d'améliorer le potentiel génétique d'une plante par la sélection, soit d'assurer l'expression maximale de ce potentiel en lui apportant ce qui est nécessaire pour l'alimenter ou en la protégeant de la compétition et des maladies (voir Figure 3). A la fin du XIXe siècle et dans la première moitié du XXe siècle, les innovations variétales, en matière de nutrition végétale et en matière de protection sanitaire ont d'ailleurs été menées séparément.

- *La sélection variétale*

La sélection de grains à semer pour obtenir des plantes à consommer a probablement été l'une des premières actions propres à l'agriculture à partir du moment où les hommes se sont sédentarisés et ont cessé de vivre de la chasse, pêche et cueillette (Feyt 2007). Cette sélection « consciente » par l'homme, par distinction avec la sélection naturelle, a permis de développer des caractères rendant les plantes plus exploitables, comme le non égrenage spontané ou l'augmentation de la taille du grain, mais aussi de diversifier les variétés pour s'adapter aux contraintes du milieu et varier les caractéristiques physiques des produits récoltés. Toutefois

l'amélioration des plantes ne connaîtra ses premières innovations qu'à partir du XVIII^e siècle, notamment grâce à l'hybridation. Il s'agit de la création de variétés améliorées par le croisement de parents choisis, l'hybridation permettant s'obtenir des spécimens plus vigoureux grâce à l'effet d'hétérosis. Le premier « hybrideur » est officiellement le pépiniériste Thomas Fairchild (*ibid.*). L'hybridation est d'abord réalisée sur des plantes qui peuvent se reproduire par multiplication végétative (ex. pour les vergers). Pour les plantes à reproduction sexuée, il faut attendre le XIX^e siècle. Les premiers essais de suivi des descendance sont réalisés vers 1800. En 1859, Vilmorin introduit le test de descendance sur des populations de céréales autogames²⁰, puis son fils met au point le schéma de sélection généalogique pour isoler et figer des lignées pures améliorées. C'est alors que naît le métier de sélectionneur-producteur de semences ou de plants (Boulaine 1996). En France, l'Etat met en place les premiers laboratoires d'essais des semences et des stations d'expérimentation agricole vers la fin du XIX^e siècle, et légifère sur le secteur de l'amélioration végétale au fur et à mesure de ses avancées.

Les effets de la sélection variétale sur les rendements commenceront à se faire sentir dès les années 1880-90. Jusqu'au milieu du XX^e siècle, la sélection ne s'appuie que sur le phénotype et non le génotype. La sélection variétale est pourtant théorisée par Mendel en 1866, mais son ouvrage « Recherches sur des hybrides végétaux » va rester méconnue de ses contemporains et sera redécouvert bien plus tard (Boulaine 1996). La sélection variétale cible l'augmentation du potentiel de rendement et va se développer de façon concomitante avec les travaux sur la physiologie végétale et la nutrition des plantes.

- *La protection des plantes*

Progressivement, la sélection des plantes et des animaux a rendu ces derniers plus productifs mais aussi plus sensibles aux maladies et à la compétition (Feyt 2007). De plus, l'extension des surfaces cultivées, l'artificialisation des milieux et les rotations courtes favorisent la multiplication des espèces nuisibles. Pline l'Ancien, auteur romain du I^{er} siècle, dans son encyclopédie « Histoire Naturelle » (*Naturalis historia*), rapporte que dès l'Antiquité des techniques de lutte sont recherchées pour protéger les graines, les semis et les produits récoltés. En plus de méthodes telles que l'application de sève de fougères toxique ou la création de nuages de fumées avec du soufre, il mentionne des modes d'organisation collective de lutte contre les maladies et les ravageurs : « Dans la Cyrénaïque, une loi oblige de faire la guerre aux sauterelles trois fois par an, celui qui y manque est puni de la peine des déserteurs. ».

²⁰ L'autogamie est un mode de reproduction par autofécondation (*Larousse Agricole 2002*)

Toutefois, si les ravageurs et mauvaises herbes sont facilement identifiables, les maladies dues aux micro-organismes sont très longtemps attribuées à des origines divines. En 1665, Hook effectue la première observation d'un champignon pathogène, l'agent de la rouille du rosier. Mais suivant les croyances de l'époque, il pense qu'il est apparu par génération spontanée à partir de la pourriture des tissus des plantes (doc Université Aix-Marseille²¹). Dans les années 1730, Duhamel du Monceau travaille sur la maladie du safran et montre qu'elle est due à un parasite dont les filaments contaminent les bulbes adjacents ; son travail est précurseur de la phytopathologie (Boulaine 1996). En 1807 Prévost démontre que le champignon *Tilletia caries* est à l'origine de la carie du blé et préconise le traitement des semences par le sulfate de cuivre.

L'accroissement des échanges commerciaux de végétaux entre continents au cours du XIX^e siècle a pour conséquence l'importation massive d'insectes et de pathogènes, si bien que de nombreuses maladies nouvelles se développent et créent des dégâts considérables. De 1845 à 1849, le mildiou se propage sur les cultures irlandaises de pommes de terre et crée une famine à l'origine de 500 000 à 1 million de morts. Le vignoble français est successivement affecté par de nombreuses maladies comme l'oïdium et le mildiou (des champignons), puis le phylloxéra (un insecte), venues du continent américain. Face à de telles crises, les recherches sur la protection des végétaux s'intensifient tout au long du XIX^e siècle. Il faut toutefois attendre les travaux de Pasteur de 1860 pour que soit rejetée la thèse de la génération spontanée et que la science progresse véritablement sur la description des cycles biologiques des champignons. Pasteur, qui se voit confier en 1880 la question de la lutte contre le phylloxéra, cherche la maladie naturelle qui éliminera cet insecte et ouvre ainsi la voie vers la lutte biologique (Dedet 2007).

Globalement, jusqu'au début du XX^e siècle, les moyens de lutte contre les ravageurs²² sont peu efficaces et peu utilisés en raison du manque d'enseignement et de communication. Or plus la production s'intensifie et plus le désenclavement des régions agricoles facilite la diffusion des pathogènes, plus les déséquilibres écologiques s'accroissent. Les produits minéraux (notamment le soufre et le sulfate de cuivre comme fongicides, l'arsenic et le plomb comme insecticides, et le mercure pour la conservation des semences) ou d'origine végétale (les pyréthrinés, la nicotine et la roténone utilisés comme insecticides) seront peu à peu remplacés au cours du XX^e siècle par des produits phytosanitaires de synthèse.

²¹ <http://biologie.univ-mrs.fr/upload/p189/pathointroduction.pdf>

²² On dénombre aujourd'hui comme ennemis des plantes 2500 espèces de « mauvaises herbes », et au niveau des bio-agresseurs 15 espèces de viroïdes, 500 virus, 200 bactéries, 8000 champignons, 500 nématodes, mais aussi des mollusques, acariens, oiseaux, mammifères... En France sur les 80 000 insectes recensés, 400 seraient nuisibles et 16 000 auraient le rôle alternativement d'auxiliaires et de parasites (Source : <http://biologie.univ-mrs.fr/upload/p189/pathointroduction.pdf>).

Des innovations qui portent de plus en plus sur des techniques élémentaires

Au début du XIXe siècle est élaboré le code rural. L'organisation de concours nationaux vise à stimuler l'innovation à la fois dans les techniques et dans les outils, et structure de véritables programmes de recherche. En 1840 est lancée la statistique agricole annuelle de façon à mieux comprendre et maîtriser la dynamique économique de ce secteur. A partir de 1868 sont créées les stations agronomiques départementales. Ce sont des établissements destinés aux « analyses chimiques sur les végétaux, les eaux, les engrais » ainsi qu'aux « expériences de physiologie végétale ou de zoologie ». Les stations expérimentales sont à la fois utilisées pour mener des travaux de recherche et pour réaliser des analyses réclamées par les agriculteurs (Denis 2007). La parcelle n'est plus située dans l'exploitation et les conditions de production sont davantage maîtrisées pour l'expérimentation. Progressivement des établissements d'enseignement dans le domaine de l'agriculture sont mis en place, et le métier d'agronome se diffuse (Boulaine 1996). En 1881 naît le ministère de l'agriculture. Peu à peu diverses décisions institutionnelles installent l'agronomie comme un nouveau champ disciplinaire, ou plutôt comme un ensemble de disciplines scientifiques et techniques centrées sur l'étude et l'amélioration de l'agriculture: économie rurale, phytotechnie et zootechnie, pédologie et chimie agricole, écologie, phytopathologie et entomologie agricole.

A la fin du XIXe et au début du XXe siècle, l'objet de conception n'est plus le système de culture dans son ensemble, mais des techniques élémentaires : on perfectionne la fertilisation, le travail du sol ou les variétés cultivées. Les équipements font aussi l'objet d'innovations importantes : tout au long du XIXe siècle, l'industrie a fourni toute une gamme de machines manuelles ou à traction animale innovantes qui ont permis de lever les contraintes de travail augmentées par les nouveaux systèmes sans jachère : nouvelles charrues, faucheuses, moissonneuses... (Mazoyer and Roudart 2002).

2. Une conception réglée rendue possible par le découplage entre agriculture et environnement

a. Le découplage entre les objets de conception et leur environnement

Avec la révolution industrielle du XIXe siècle, l'agriculture connaît de profonds bouleversements. Outre la fourniture d'outils et de nouveaux intrants, l'industrie développe de nouveaux moyens de transport, tels que le bateau à vapeur et chemin de fer, qui favorisent l'essor des échanges internationaux et offrent de nouvelles perspectives pour la production agricole française (Boulaine 1996). La production est alors de moins en moins tournée vers l'autoconsommation,

mais davantage vers les cultures de rentes, ce qui conduit à une spécialisation progressive des productions. Toutefois dans les années 1870, la France a beaucoup de retard sur le plan de la diffusion des savoirs par rapport à ses voisins, notamment l'Allemagne. Les investissements dans le secteur agricole manquent, et le progrès des connaissances des XVIII^e et XIX^e siècles est fortement ralenti au cours des deux premières guerres mondiales. De 1870 à 1945, le visage de la France rurale change peu : les rendements restent faibles et les innovations, telles que le tracteur, le béton armé, le moteur à explosion, l'électricité, les produits chimiques de synthèse, ou ceux résultant des applications de la microbiologie, ne se diffusent que très lentement (*ibid.*). Par ailleurs les campagnes sont dépeuplées avec l'exode rural, massif entre 1871 et 1914, et les guerres. Le pays est affaibli et la pénurie alimentaire frappe la population. L'Etat décide alors de lancer un grand programme de modernisation agricole, non seulement pour améliorer les conditions de vie des paysans, mais aussi pour nourrir une population dont la croissance décolle. La seconde moitié du XX^e siècle est alors le théâtre d'une profonde mutation du secteur agricole.

Après la seconde guerre mondiale, modernisation des exploitations, intensification de la production et mécanisation deviennent le leitmotiv des politiques de reconstruction et des leaders syndicaux (Pluvineau and Mayaud 2007). En effet, un système de cogestion entre un syndicat agricole longtemps unique²³, la Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles (FNSEA), et l'Etat se met en place pour décider des objectifs de la modernisation agricole (Cordellier and Le Guen 2008). La Politique agricole commune (PAC), mise en place à l'échelle de l'Union Européenne en 1957, soutient également cette modernisation en se fondant principalement sur des mesures de contrôle des prix et de subventionnement. Le Traité de Rome de 1957, qui instaure un marché commun, garantit l'écoulement des produits agricoles à des prix rémunérateurs. Peu à peu se met en place une véritable course à la productivité dans laquelle s'engagent la plupart des agriculteurs et des professionnels du monde agricole soutenus par les pouvoirs publics. Ces acteurs partagent un objectif clair : augmenter les rendements agricoles.

La pensée agronomique change et soutient cette mutation. Dès 1920, les recettes techniques basées sur l'expérimentation remplacent les traditions (Boulaine 1996). Les préoccupations économiques prennent une place prédominante dans les raisonnements. L'objectif d'augmentation du rendement devient l'objectif essentiel des recherches, très largement partagé entre les chercheurs, les agriculteurs, l'Etat, les entreprises de l'agrofourmiture et la société. Au cours du XX^e siècle, le savoir agronomique se morcelle, avec l'apparition de nouvelles disciplines issues de la scission de l'agronomie (bioclimatologie, science du sol, écophysiologie

²³ La FNSEA est effectivement le seul syndicat agricole des années 1950 aux années 1980, et reste encore aujourd'hui majoritaire.

végétale...) et devient normatif : il produit essentiellement des références établies dans des conditions particulières (Jouve 2007). Les plantes et les animaux sont modélisés comme des machines dont on peut optimiser le rendement (Boulaine 1996), toutes choses étant égales par ailleurs. L'objectif est désormais de produire des connaissances génériques et décontextualisées, d'optimiser des systèmes considérés comme stables et prédictibles, en supprimant les perturbations et en réduisant la diversité de l'environnement. Dans ce contexte, la conception est pensée à l'échelle de la plante (ou de l'animal) et de la parcelle. Ainsi, le modèle agricole qui se développe jusqu'aux années 1970-1980 vise à s'extraire des aléas liés aux régulations naturelles des écosystèmes. Il est basé notamment sur la substitution aux processus naturels des produits de synthèse, sur l'introduction de variétés performantes auxquelles il faut apporter les intrants en quantité nécessaire, et sur la standardisation des techniques et des procédés. Cette logique de découplage et de confinement crée une rupture fondamentale avec les approches qui visaient à optimiser les ressources et potentialités locales en adaptant les espèces cultivées aux conditions pédoclimatiques, ou en agençant mieux les productions dans le temps et dans l'espace (Paillot 2000).

Les produits minéraux comme le cuivre deviennent rares à l'issue la première guerre mondiale, ce qui favorise le développement de la chimie organique. A partir de 1950, le marché offre aux agriculteurs des produits phytosanitaires efficaces, peu coûteux et faciles d'emploi. L'industrie chimique voit dans l'agriculture un débouché lucratif. Un puissant réseau industriel et commercial se met en place, ainsi que des stations d'avertissement et de recherche. La consommation des produits phytosanitaires double tous les 10 ans entre 1945 et 1985. Avec les progrès de la génétique s'accélère la création de nouvelles variétés plus performantes et adaptées aux besoins des agriculteurs, des industriels et des consommateurs. Cependant ces variétés sont aussi plus exigeantes et plus fragiles, ce qui tend à favoriser leur protection par voie chimique aux dépens d'autres voies. A titre d'exemple, au cours des années 1960, l'arboriculture appliquait jusqu'à trente traitements par les produits phytosanitaires par saison pour maîtriser les populations de ravageurs et de maladies (Meynard and Girardin 1991). De plus, seule une petite dizaine d'espèces font l'objet d'efforts de sélection génétique, en particulier le blé, l'orge, le maïs grain et le colza, si bien que de nombreuses espèces parfois mieux adaptées localement sont abandonnées. Dans les zones de grandes cultures, les rotations sont raccourcies de manière à privilégier une production destinée à l'alimentation humaine et animale et pouvant être exportée.

Parallèlement à cela, les cycles naturels et les transferts de fertilité entre élevage et agriculture par l'intermédiaire de fumier sont largement remplacés par l'utilisation d'engrais chimiques.

L'utilisation de ces derniers s'accélère à partir des années 1920 avec l'acquisition de gisements par l'Etat français et la découverte de procédés industriels permettant de les produire en masse. Le sol est considéré comme un substrat dans lequel il suffit d'équilibrer les entrées et les sorties de nutriments selon des méthodes de bilan. L'usage d'engrais chimiques rend possibles la spécialisation et la relocalisation des productions. Les régions de plaine telles que le Bassin Parisien sont dédiées aux productions végétales tandis que d'autres régions sont consacrées à l'élevage (Meynard 2010) : celles dont les milieux sont plus accidentés, ou bien les zones littorales comme la Bretagne afin de favoriser les importations d'aliments et les exportations de viande par voie maritime. Les systèmes de polyculture-élevage, jadis fortement représentés dans la plupart des régions, sont devenus de moins en moins nombreux à partir des années 1970. Meynard (2010) décrit ainsi cette nouvelle logique de production : « le raccourcissement des rotations augmente les problèmes de parasitisme tellurique et les populations d'adventices. La concentration des surfaces sur certaines espèces accroît les risques de développement d'épidémies de parasites aériens. Cette spécialisation ne serait pas possible sans les pesticides²⁴, qui sont devenus la clé de voûte des systèmes de culture intensifs actuels, et configurent non seulement les rotations, mais aussi les dates de semis et les choix variétaux. (...) Face à des risques élevés, une couverture serrée de la culture par les traitements phytosanitaires devient impérative. Pour faciliter des interventions rapides, les agriculteurs ont privilégié l'achat de matériel puissant et de grande largeur, et cherché à regrouper et agrandir leurs parcelles. C'est ainsi que dominant dans les paysages de grandes cultures, des systèmes intensifs, pratiqués sur de grandes parcelles génétiquement homogènes, et fortement utilisateurs de pesticides » (Meynard (2010), p. 4). Les paysages agricoles changent brutalement, le métier d'agriculteur aussi. Désormais les exploitants investissent dans des équipements de plus en plus performants et coûteux, achètent des intrants en masse, et cherchent à maintenir leurs revenus en augmentant les rendements.

Le découplage des régulations écologiques est réalisé dans le cadre d'un raisonnement de modularisation des systèmes cultivés initié au XIX^e siècle : comme le représente la matrice de Suh (Suh 1990) diagonalisée de la Figure 5, les concepteurs cherchent à découpler les fonctions attendues du système agricole et d'associer à chacune des paramètres de conception indépendants. Les agriculteurs disposent à présent des moyens de maîtriser la majorité des facteurs limitant la production, notamment la verse grâce aux variétés résistantes et aux régulateurs de croissance, la nutrition azotée grâce à la méthode des bilans, les maladies avec les

²⁴ Un pesticide est une substance ou une préparation destinée à lutter contre les nuisibles animaux et végétaux des cultures et des produits récoltés (Larousse Agricole 2002).

fongicides, les insectes parasites avec les insecticides et les mauvaises herbes avec les désherbants. C'est finalement le fonctionnement photosynthétique du couvert qui devient le facteur limitant la production. Pour répondre à cela, de nouvelles recherches portent sur l'allongement de la durée du cycle cultural, l'avancement des semis et l'augmentation des densités pour accroître la surface foliaire (Meynard and Girardin 1991). Ainsi non seulement les effets des techniques sont considérés de façon indépendante, mais certains effets de l'environnement ou sur l'environnement sont occultés par le confinement du système de conception. Ce confinement est en partie réalisé avec l'artificialisation des milieux et la substitution de cycles naturels par différentes techniques, mais en réalité les effets des systèmes de production sur l'environnement s'aggravent et sont longtemps négligés.

FR \ DP	Nourrir les végétaux	Protéger des maladies, ravageurs...	Lutter contre les adventices	Améliorer la structure du sol	Compenser la destruction de la faune du sol
Engrais chimiques					
Produits phytosanitaires					
Herbicides					
Labour					
Apport de matière organique					

Figure 5 : Le découplage des fonctions et des paramètres de conception des systèmes agricoles
 Cette figure reprend la structure d'une matrice de conception d'après Suh (1990), avec les paramètres de conception en lignes (DP pour *Design Parameters*), et les fonctions requises en colonnes (FR pour *Functional Requirements*). Cette matrice montre que des paramètres répondent de manière largement découplée aux grandes fonctions requises des pratiques de production, y compris pour remédier aux dérégulations engendrées, telles que la destruction de la faune du sol par le labour et les produits phytosanitaires.

Cette généalogie des systèmes de conception de l'agriculture souligne un resserrement et un confinement progressifs des objets de conception agricole, significatif jusqu'aux années 1980-90, que nous illustrons de façon schématique par la Figure 6. Nous qualifions cette trajectoire de la conception agricole d'optimisation s'affranchissant des aléas de l'environnement. Elle traduit le fait que jusque récemment, l'écologie avait progressivement disparu des raisonnements de conception.

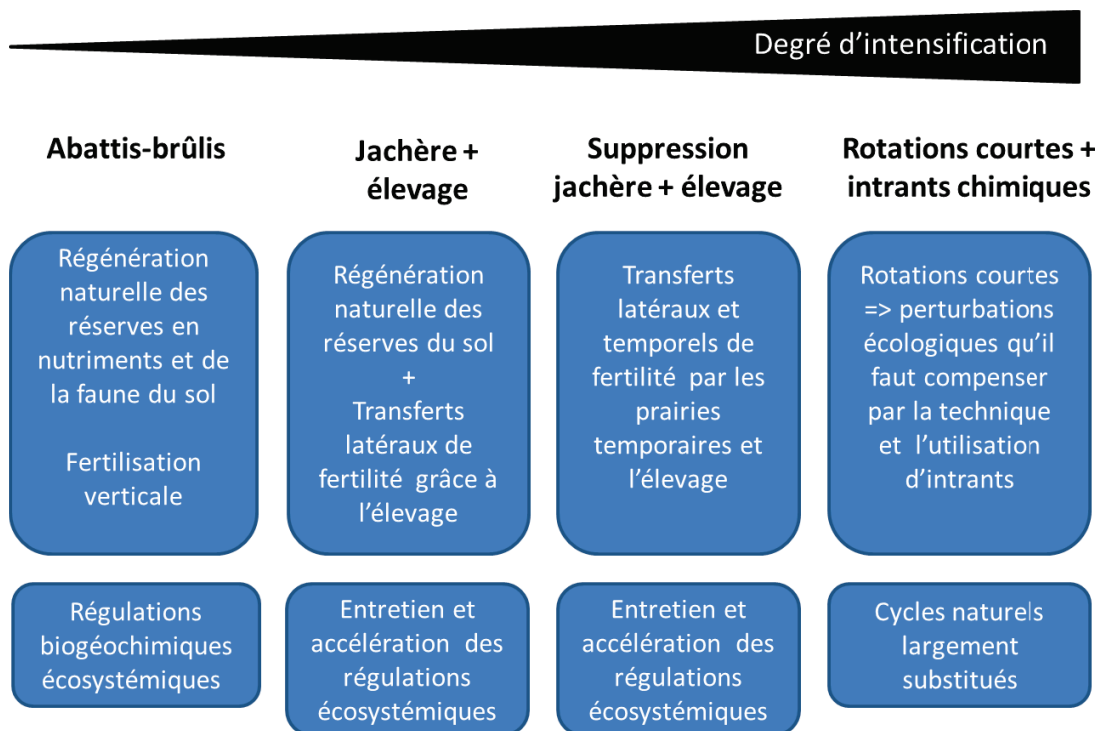


Figure 6 : La substitution progressive des cycles naturels par les techniques au cours de l'histoire de l'agriculture

Ce schéma reprend, pour les quatre grands systèmes de production présentés dans notre généalogie, la façon dont sont pensés les mécanismes de fertilisation et dont les régulations écosystémiques sont mobilisées ou au contraire substituées par la technique.

b. La mise en place d'un système de conception réglée performant

L'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) est créé en 1946. Il concentre l'essentiel des efforts de recherche dans le domaine de l'agronomie jusque dans les années 1970. Il absorbe la plupart des stations expérimentales, qu'elles soient publiques ou privées. A ses débuts, l'institut comporte 282 agents dont 157 chercheurs ; en 2012 il en compte près de 8500, dont 1840 scientifiques et 2590 ingénieurs, répartis dans près de 150 sites de recherche et d'expérimentation (Boulaine 1996). A partir des années 1950 sont créés les instituts techniques qui prennent en charge l'essentiel de la recherche appliquée. Un partage du travail de conception s'est rapidement défini entre l'INRA et ces derniers : l'INRA, qui dispose de plus de liberté d'exploration de solutions innovantes et de changements radicaux, s'investit davantage dans la conception innovante, tandis que les instituts techniques qui, du fait de leurs missions, sont tenus de travailler sur des solutions immédiatement opérationnelles, se concentrent sur l'amélioration incrémentale des pratiques en lien avec le dispositif de développement agricole (Coulon and Meynard 2011). Un système de transfert de connaissances linéaire, de la recherche aux agriculteurs en passant par un ensemble d'intermédiaires, s'organise et devient très performant. Les agriculteurs, bénéficient des avancées technologiques essentiellement produites en amont de

la profession par un système de conception hiérarchisé et organisé, mais par la même occasion la conception leur échappe quasiment totalement.

Dès le début du XXe siècle, les agriculteurs créent des coopératives pour l'achat de matériel et la transformation des produits (notamment le lait et le vin). Cette tendance est d'ailleurs encouragée par les pouvoirs publics dès les années 1930, qui confient également la vulgarisation des découvertes techniques aux chambres d'agriculture et aux instituts techniques. La mise en place d'organismes de vulgarisation et de réseaux commerciaux sur tout le territoire, chargés notamment de diffuser des connaissances et de fournir des services auprès des exploitants agricoles mais aussi pour diffuser les innovations techniques, favorise l'augmentation rapide de l'utilisation des intrants agricoles. Les organisations professionnelles agricoles sont impliquées dans la régulation économique, sociale, technique et politique de l'agriculture depuis les années 1950 ; 97% des agriculteurs y adhèrent (Le Guen 2008). Le Guen (2008) en distingue cinq grandes catégories, selon leurs champs d'intervention et leurs modalités d'intervention : 1) les organisations économiques, telles que les interprofessions qui permettent par exemple le soutien de productions données ou les coopératives agricoles ; 2) les organisations de service-conseil qui contrôlent l'appui technique et économique aux exploitations (coopératives, centres de comptabilité-gestion) ; 3) les organisations de développement qui s'investissent entre appui collectif et conseil individualisé (ex. : CETA²⁵, associations de développement rural) ; 4) les organisations engagées dans la mise en œuvre de politiques publiques (ex. chambres d'agriculture, ADASEA²⁶) ; et enfin 5) les syndicats agricoles (FNSEA, Confédération paysanne...). Le secteur agricole est extrêmement structuré et organisé. Cependant, il est non seulement divisé verticalement, avec en amont la R&D et la production d'intrants agricoles et en aval les industries alimentaires, mais aussi horizontalement, avec la spécialisation progressive des productions selon les régions, surtout à partir des années 1970.

Entre 1960 et 1990, la plupart des améliorations dans les modes de culture ou d'élevage relèvent de la conception réglée (Le Masson *et al.* 2006; Meynard *et al.* 2006). Dans un régime de conception réglée, les objectifs de conception sont bien définis, par conséquent les expertises disponibles, et les processus de validation (prototypes, essais, tests, division du travail) peuvent être définis à l'avance. Cette stabilité permet le déploiement à grande échelle de méthodes (ex.: *systematic design*, gestion de projet, démarche expérimentale, etc.) et d'une organisation du travail de conception par métiers et distinguant la recherche du développement. En effet, les objectifs de modernisation agricole sont clairs et prédéfinis : augmenter la productivité à l'hectare ou par

²⁵ CETA : Centre d'études techniques agricoles

²⁶ ADASEA : Association départementale pour l'aménagement des structures des exploitations agricoles

animal ; les rendements constituent des indicateurs de performance acceptés. Les disciplines scientifiques progressent de façon plus ou moins articulée, mais l'ensemble des travaux de recherche et développement concourt à cet objectif de production, que ce soit la sélection génétique, l'amélioration de la fertilisation ou la protection phytosanitaire. La conception se morcelle, notamment car les instituts techniques sont organisés par filière : les oléagineux sont séparés des céréales et la grande culture dissociée de l'élevage. Cette organisation empêche de penser les complémentarités entre ces domaines. Les objectifs fixés évoluent de façon progressive, « tendancielle », sans rupture. Cela ne remet pas en cause le décollage significatif de la production agricole au XXe siècle, avec un rendement moyen du blé qui augmente de 120 kg/ha/an, passant de 15 q/ha à la sortie de la guerre à 70 q/ha aujourd'hui. Cependant, si la conception innovante a ponctuellement joué un rôle important dans l'accroissement de la productivité (*i.e.* insémination artificielle, invention des régulateurs de croissance des céréales...), on peut considérer que l'augmentation considérable de la production par hectare des céréales, du rendement laitier des vaches ou encore de la productivité des porcs relève beaucoup de la conception réglée (Meynard *et al.* 2006). C'est dans ce cadre que s'est mis en place le *dominant design* (Le Masson *et al.* 2006) de l'agriculture, un régime de conception extrêmement stabilisé dont la remise en cause sera par la suite très difficile.

3. Mise en évidence des limites de la trajectoire agricole par la crise environnementale

a. La prise en compte de l'hétérogénéité des conditions de culture et conception d'objets plus intégrés

Jusqu'à la fin des années 1960, la pensée agronomique s'est tournée vers la suppression des hétérogénéités et l'application du « toutes choses égales par ailleurs ». Mais elle change à partir des années 1970, et s'intéresse davantage aux modalités qui affectent les rendements en fonction des milieux, des circonstances et des conditions du travail (Sebillotte 1974). Ainsi, on n'étudie plus « le sol » mais « les sols », et les formules de fumure²⁷ préconisées ne sont plus le résultat de recettes passe-partout mais sont adaptées aux différents types de sols (Boulaine 1996). Les fondements théoriques de la fertilisation sont d'ailleurs profondément modifiés. On comprend l'influence du pH, et l'on découvre que ce sont des ions et non des sels qui sont échangés (*ibid.*). Les connaissances sur la pédologie progressent : il ne s'agit plus seulement de restituer les

²⁷ La fumure permet l'entretien ou amélioration de la fertilité du sol par enfouissement de fumier. Par extension, elle correspond à toute quantité d'engrais, d'amendement ou d'unités fertilisantes apportée à une culture ou à une succession de cultures. (*Larousse Agricole 2002*)

exportations mais d'optimiser dans le sol les conditions d'alimentation de la plante. L'analyse des sols devient alors un préalable à toute décision technique.

De même, les pratiques expérimentales changent profondément : alors qu'avant les approches relevaient de disciplines fondamentales comme la chimie et la physique, et que les techniques étaient appliquées à des domaines considérés séparément (les sols, les plantes, les animaux, etc.), elles visent désormais à résoudre des problèmes posés de manière interdisciplinaire (Boulaine 1996). Ainsi, en réaction avec les approches analytiques des périodes précédentes, l'agronomie tend à devenir une science autonome, développant une approche plus synthétique et plus systémique de phénomènes étudiés (Jouve 2007). Selon Sebillotte (1974, p. 2), c'est notamment grâce aux progrès technologiques qu'il devient « possible et nécessaire d'aborder plus finement les mécanismes d'élaboration du rendement et donc de réintroduire une démarche synthétique ». La production scientifique attendue n'est plus l'établissement plus ou moins empirique de références, mais la mise à jour de mécanismes rendant compte du fonctionnement d'un couvert végétal cultivé et de la façon dont s'élabore le rendement d'une culture (Jouve 2007).

Selon Sebillotte (1974, p. 3) « l'agronomie s'intéresse aux relations de la plante cultivée en tant que peuplement végétal avec le sol et le climat, considérés comme un ensemble. L'agronomie cherche à comprendre comment cet ensemble évolue au cours du temps (...) et aboutit à une production. » L'étude des relations entre les éléments d'un système, le champ cultivé et non plus la plante considérée de façon isolée, devient fondamentale pour l'agronomie, qui cherche à établir les lois de fonctionnement du couvert végétal cultivé (Jouve 2007). Sebillotte (1974) introduit la notion d'itinéraire technique²⁸ pour mettre en évidence les interactions entre techniques culturales, ce qui remet en question la vision modularisée des fonctions et paramètres de conception du système. Il casse également ainsi la relation traditionnelle entre techniques culturales et rendement (vision dans laquelle le champ cultivé serait une boîte noire), et la remplace par l'étude des relations « techniques culturales - effets sur le milieu physique - effet sur la culture et son rendement » (Sebillotte 1974).

Pendant longtemps le développement agricole est conçu comme un changement technique résultant de « transfert de technologie » ou de « paquets technologiques », grâce auxquels l'homme allait se rendre « maître de la nature » (Jouve 2007). Mais les stratégies et modalités de développement sont progressivement revues de manière à mieux prendre en compte les contraintes, points de vue et connaissances des agriculteurs. Les agronomes passent alors de

²⁸ Il les définit comme des « combinaisons logiques et ordonnées de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée. »

l'étude des techniques à l'étude des pratiques, qui elles tiennent compte des contingences liées aux agriculteurs (*ibid.*). Sebillotte notamment souligne le besoin d'appréhender la variabilité du réel afin de mieux répondre aux questions des agriculteurs. En effet il n'est généralement pas possible d'extrapoler les références techniques pour émettre des diagnostics et conseiller les exploitants. Ainsi, aux expérimentations en stations expérimentales s'ajoute une nouvelle approche, basée sur le développement des enquêtes agronomiques. Celle-ci vise à analyser le fonctionnement des exploitations agricoles et à prendre en compte l'influence sur les niveaux de rendement des conditions du milieu biophysique, des pratiques des agriculteurs et de l'histoire des parcelles. La prise en compte de l'acteur dans l'étude des processus de production constitue un changement épistémologique important pour l'agronomie, qui doit désormais rendre compte de situations singulières et faire davantage appel aux sciences sociales de façon à comprendre les choix des agriculteurs (Jouve 2007). Ceci constitue, selon Hatchuel (2000a), un changement épistémologique dans la mesure où l'agronomie, après avoir privilégié le « modèle » du laboratoire puis celui du terrain pour produire des connaissances, s'engage dans celui de la recherche-intervention pour produire des connaissances pour l'action. L'accent mis sur l'étude des relations pour rendre compte de situations complexes a plus largement conduit les agronomes à développer des démarches systémiques et à considérer les différents niveaux d'organisation au sein desquels est raisonnée la conduite des cultures : les systèmes de cultures sont en effet inclus dans des systèmes production, eux-mêmes inclus dans des systèmes agraires (Jouve 2007). Or le système n'est pas donné à priori, il faut en construire un modèle, qui permet d'émettre un diagnostic, puis de choisir et proposer différentes voies pour résoudre le problème initial (Sebillotte 1996).

Ainsi dès les années 1970, certains agronomes soulignent la nécessité de modifier les approches et les modélisations pour la conception de systèmes agricoles. Toutefois l'objectif de l'augmentation du rendement reste primordial et le *dominant design* n'est pas encore remis en cause.

b. Les préoccupations environnementales et la remise en cause du régime de conception dominant de l'agriculture

C'est à partir de la fin des années 1970 que ce modèle agricole fondé sur une forte utilisation d'intrants chimiques est remis en cause, essentiellement en raison de l'augmentation du prix de revient de certains produits, et alors qu'émergent les préoccupations pour les questions environnementales. De plus, ce modèle conduit à des crises de surproduction qui entraînent des chutes de prix difficiles à supporter pour les agriculteurs. Les intrants, maintenus à bas coûts, sont utilisés massivement, souvent de manière préventive. En culture céréalière, les pratiques de

superfertilisation (application de doses d'engrais supérieures à ce qui serait strictement nécessaire pour obtenir la meilleure marge brute sur la culture) sont fréquemment observées dans les années 1980-90. Elles relèvent de stratégies d'assurance : l'agriculteur accepte un surcoût d'intrant par souci de sécurité, lorsqu'il sait que la perte financière sera plus élevée si la fumure appliquée est inférieure à l'optimum que si elle lui est supérieure d'autant (Meynard and Girardin 1991). De telles stratégies se retrouvent pour les régulateurs de croissance, les insecticides et les fongicides (Wahl *et al.* 1985). Elles ont une responsabilité importante dans la pollution des eaux souterraines. Pourtant, pendant des années les pertes en nitrates ou en produits phytosanitaires dans les nappes ne sont pas prises en compte, et les efforts pour tenter de les réduire sont extrêmement longs à se mettre en place. Les espèces sauvages inféodées aux milieux agricoles sont également largement ignorées, alors qu'elles sont souvent très affectées par les bouleversements rapides des milieux et l'intensité des pratiques agricoles (travail du sol, traitements, etc.) (IFEN 2002). L'essor du concept de développement durable à partir de la conférence de Rio de 1992 marque notamment un nouveau virage avec l'apparition de préoccupations concernant la dégradation des ressources naturelles (baisse de fertilité des sols, pollution des eaux, érosion, perte de biodiversité...) occasionnée par l'industrialisation de l'agriculture.

L'identification de nouveaux objectifs à prendre en compte, tels que la qualité sanitaire et gustative des produits, le maintien de l'identité culturelle de certains terroirs, ou la préservation de l'environnement, remettent en cause le régime de conception réglée. Celui-ci doit concilier des impératifs techniques, économiques, environnementaux et éthiques. Les objectifs deviennent alors parfois difficiles à définir et à évaluer, d'autant plus que de plus en plus d'acteurs (acteurs de l'environnement, des filières, des territoires, du tourisme, consommateurs) se sentent concernés par les activités agricoles et leurs conséquences et demandent à être associés aux choix faits pour orienter la trajectoire de l'agriculture. Dans ce contexte, les pratiques agricoles deviennent l'objet de débat public, de négociations, de normes et de réglementations. Les pouvoirs publics s'impliquent de plus en plus dans les transformations de l'agriculture, par le biais des politiques agricoles, sanitaires, environnementales ou encore territoriales (Meynard *et al.* 2006). Les expertises et les méthodes d'évaluation des résultats de ces nouveaux systèmes sont à construire et sont l'objet de débat. La prise en compte de ces enjeux environnementaux nécessite également que la recherche agronomique change d'échelle à la fois de temps et d'espace. D'une part, elle doit prendre en compte le temps long pour étudier l'impact des processus productifs sur l'état et le renouvellement des ressources ; d'autre part elle doit considérer des échelles plus larges telles que le territoire ou le bassin versant. Cette nouvelle situation appelle alors à la mise en place d'un régime de conception innovante, que Le Masson *et al.* (2006) décrivent comme un processus

d'exploration où il n'est pas possible de spécifier précisément à l'avance les objectifs, les expertises et les modes de validation. L'identité-même des objets de conception (les plantes cultivées, les systèmes de production, etc.) doit être révisée. Les systèmes de relations, d'organisation et de production de connaissances doivent être repensés pour faire face aux nouveaux défis de conception.

c. Des efforts engagés mais qui restent à poursuivre

Pourtant, une première réponse du secteur agricole est d'améliorer le système à la marge, sans le remettre en cause, de façon à minimiser ses impacts environnementaux et à mieux répondre aux enjeux de qualité. Le concept d'« agriculture raisonnée » est alors mis en avant par la profession agricole, qui avec la recherche (en particulier les instituts techniques) se fixe comme objectif de soutenir le développement d'une agriculture maintenant voire augmentant les rendements des cultures et des productions animales, tout en respectant les équilibres naturels. Les principes de l'agriculture raisonnée sont de respecter de la meilleure façon possible la nature tout en maintenant, voire même en améliorant, la rentabilité économique des exploitations, en favorisant la qualité technologique et bien sûr sanitaire des produits (Paillot 2000). L'agriculture raisonnée ne vise pas à réviser le système en place, le *dominant design*, mais à intégrer de nouvelles connaissances et technologies qui permettraient de réduire les impacts négatifs des pratiques agricoles de l'environnement. De nouveaux objectifs sont intégrés, de nouvelles connaissances sont produites, on enrichit les critères de performance, mais on reste en quelque sorte dans un productivisme sous contrainte. L'identité des objets n'est pas changée, les modes d'organisation non plus. On reste dans une logique de décision individuelle : les agriculteurs décident des pratiques qu'ils mettent en œuvre sur leurs parcelles. De fait, l'agriculture est un cas typique de ce que les chercheurs en sociologie et en économie de l'innovation appellent « verrouillage » (Liebowitz and Margolis 1995) : la spécialisation des territoires est structurée par des implantations agro-industrielles, qui assurent les débouchés aux produits. Les agriculteurs, comme leurs conseillers, sont de plus en plus spécialisés. Les systèmes de production agricole sont donc devenus totalement cohérents avec l'organisation de filières amont et aval et avec les systèmes de diffusion d'information, et la stratégie de chaque acteur renforce celle des autres (Meynard 2010).

Depuis les années 1980, un nombre croissant d'agronomes se penchent sur la « reconception » des systèmes de production agricole (Meynard *et al.* 2006), c'est-à-dire la conception de nouveaux systèmes à partir de systèmes existants, en orientant leur dynamique en faveur de la durabilité. Les activités de reconception impliquent à la fois une évaluation des systèmes existants et la

formalisation d'objectifs explicites guidant les changements, *in itinere* (Bellon *et al.* 2007). Elles cherchent à mieux prendre en compte les équilibres au sein du système, de manière à garantir fertilité, productivité et propriétés de résilience du système. Un rapport de Coulon et Meynard (2011) sur les voies d'amélioration technique proposées par l'INRA souligne que si « plus de la moitié solutions proposées vise à augmenter l'efficacité de certains intrants ou à leur substituer des ressources moins rares », environ « un tiers s'attache à proposer de nouveaux systèmes intégrant des modifications parfois profondes de leur fonctionnement et associant des modifications de pratiques dans différents éléments du système », et proposent des options de reconception de systèmes qui vont au-delà de la poursuite des évolutions tendancielle.

De nombreux systèmes de production alternatifs sont par ailleurs aujourd'hui proposés, tels que l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation. Ils vont plus loin que l'agriculture raisonnée dans le développement d'approches complexes, qui s'intéressent davantage au fonctionnement des écosystèmes. Ces modèles alternatifs ont été développés d'abord empiriquement, souvent en opposition à la recherche agronomique. Chacun met l'accent sur des enjeux plus ou moins ciblés et ouvre dans ce cadre de nouvelles voies d'action ; mais aucun n'est en mesure de répondre à l'ensemble des dégradations d'un écosystème.

Du côté des politiques publiques, divers instruments ont été mis en œuvre. En Europe par exemple, la Politique Agricole Commune (PAC) a mis en place depuis 2005 la conditionnalité des aides aux agriculteurs. Des outils contractuels ont également été développés, telles que les mesures agro-environnementales (MAE). D'autres initiatives existent pour restreindre les pratiques agricoles dégradant l'environnement et à encourager des pratiques alternatives : par exemple au niveau Européen la Directive Cadre sur l'Eau, ou les Directives Oiseaux et Habitats et au niveau international les politiques en faveur des services écosystémiques. Les actions publiques en faveur de la préservation de biens communs environnementaux ont généré et se sont appuyées sur des innovations réglementaires et juridiques, organisationnelles et scientifiques.

Mais la plupart de ces initiatives butent sur au moins deux difficultés: d'une part l'objet ciblé est généralement une ressource en particulier (l'eau, la forêt, une animal...) qui est individualisée dans le système de production ; d'autre part les dispositifs d'action sont essentiellement pensés au niveau individuel ; la contractualisation incitative individuelle est l'outil de gestion privilégié, l'action collective lui est subordonnée ou en est déconnectée. De nouvelles approches sont donc encore nécessaires pour développer des processus d'innovation pensés à l'échelle des écosystèmes, tels que le préconisent de nombreux scientifiques et pouvoirs publics, c'est-à-dire

des processus qui prennent en compte leur fonctionnement des écosystèmes et qui envisagent une action collective à cette échelle.

A travers un rappel de l'histoire des raisonnements et de la modélisation dans le domaine de l'écologie, nous proposons à présent de comprendre comment a émergé ce concept d'écosystème et en quoi il peut permettre de repenser les processus de conception pour l'agriculture.

Chapitre II. Progrès de la modélisation en écologie : la mise en évidence de la complexité des régulations écologiques

1. Une généalogie des modèles de l'écologie : de la géographie des plantes aux écosystèmes

Cette partie vise à rendre compte de la façon dont l'identification d'unités d'analyse des systèmes écologiques et les progrès de la modélisation ont permis de faire progresser les connaissances en écologie et la compréhension du vivant. Cette analyse est globalement chronologique ; elle n'est pas exhaustive mais vise à dégager les grandes étapes du progrès de ces modélisations. Elle s'appuie notamment sur plusieurs livres d'histoire de l'écologie (Acot 1988; Drouin 1991; Blandin 2009), des manuels d'écologie (Odum 1971; Begon *et al.* 2005) et des entretiens avec des écologues. Nous avons surtout insisté sur les connaissances concernant l'écologie fonctionnelle et ne mentionnons que très peu celles concernant l'écologie évolutive, bien que ce courant apporte également des connaissances utiles à l'agronomie. En effet, il nous a semblé que le premier courant était davantage impliqué dans l'émergence de la notion d'écosystème.

a. L'analyse des interactions entre les êtres vivants et avec leur milieu : les travaux précurseurs d'une discipline

Le concept d'économie de la nature et les interrelations entre espèces

L'écologie est une discipline assez jeune, qui date de la fin du XIXe siècle, mais dont les racines sont très anciennes. L'homme en effet s'intéresse aux phénomènes de la nature depuis des millénaires, comme en témoignent certains écrits d'Aristote, Théophraste, Pline l'Ancien ou encore Hippocrate. Aristote notamment, dont le traité *Histoire des Animaux* expose de nombreuses observations témoignant de préoccupations identiques à celles qui animeront les écologues des siècles plus tard : « les animaux sont en guerre les uns avec les autres quand ils occupent les mêmes lieux et qu'ils usent, pour vivre, des mêmes ressources », ou encore « de

même (...) que pour les plongeurs, certains fabriquent des appareils pour respirer et rester longtemps sous la mer en aspirant grâce à l'appareil l'air de la surface, de même c'est sur ce principe que la nature a réglé la taille du nez de l'éléphant » cité par Acot (1988), p. 12-13. Toutefois il n'élabore pas de véritable théorie à partir de ces observations, et n'introduit pas de concept réellement fondateur pour l'écologie.

C'est chez le naturaliste suédois Carl von Linné que nous retenons un premier concept, celui d'« **économie de la nature** » (*oeconomia naturae*), qu'il définit en 1749 comme « la très sage disposition des êtres naturels, instituée par le Souverain Créateur, selon laquelle ceux-ci tendent à des fins communes et ont des fonctions réciproques ». Linné introduit à travers ce concept plusieurs idées fondamentales qui vont profondément marquer l'histoire de la pensée en écologie. Il met en avant les interrelations entre tous les êtres vivants et la notion d'équilibre de la nature auquel chaque espèce contribue (une notion déjà introduite à l'Antiquité) : « Si une seule fonction importante manquait dans le monde animal, on pourrait craindre le plus grand désastre dans l'univers (...) si dans nos terres, les moineaux périssaient tous, nos plantations seraient la proie des grillons et autres insectes » (cité par Drouin (1991) p. 40). Il introduit donc une vision fonctionnelle du vivant qui caractérise l'écologie. Toutefois, comme le souligne Acot (1988), si ce concept d'économie de la nature permet de penser les interrelations infiniment complexes des « corps naturels » des trois règnes (minéral, végétal et animal), c'est selon une fin que Dieu a voulue -la pérennité des espèces, et par un moyen qu'Il a conçu- le maintien de la proportion des espèces. La pensée de Linné est en effet empreinte de finalisme et de providentialisme. Ces postulats métaphysiques seront progressivement abandonnés par les scientifiques.

Drouin (1991) affirme que le concept d'économie de la nature annonce trois grands domaines de recherche qui seront traités plus ou moins indépendamment par la suite :

- 1) L'interdépendance des espèces : ce sont surtout les relations de prédation qui sont étudiées, notamment dans le cadre de recherches sur la lutte biologique pour la protection des cultures. Jusqu'au début du XXe siècle, ces phénomènes font l'objet d'observations qualitatives et concernent essentiellement les sciences animales.
- 2) La circulation des éléments : les progrès de la chimie à la fin du XVIIIe siècle ont permis de grandes avancées sur la compréhension des échanges gazeux et de matière, donc des mécanismes impliqués dans la nutrition et la respiration des plantes comme des animaux.
- 3) La localisation des espèces en fonction du climat et des conditions du milieu, un sujet qui sera traité par la géographie des plantes que nous allons présenter plus en détail dans ce qui suit.

La géographie des plantes et l'adaptation des espèces à leur milieu

La fin du XVIII^e siècle, avec les contributions de Linné, Buffon, Lamarck ou encore Cuvier, connaît de grands progrès dans le domaine de l'Histoire Naturelle, notamment sur la connaissance, l'identification, la nomenclature et la classification des espèces. Les grandes expéditions des naturalistes, la constitution d'herbiers, de jardins botaniques, de ménageries et autres collections, stimulent les recherches dans ce domaine. Mais l'accroissement considérable du nombre d'espèces connues suscite des difficultés pour les naturalistes, dont l'activité alors essentiellement descriptive consiste à reconnaître les espèces pour les classer (Acot 1988). De nouvelles questions émergent : Comment les plantes se répartissent-elles à la surface du globe ? Comment expliquer des régularités morphologiques chez des plantes n'appartenant pas à la même espèce ? Faut-il revoir les critères de classification ?

De telles questions motivent la création d'une nouvelle discipline, qu'Alexandre de Humboldt baptise « géographie des plantes », une « science qui considère les végétaux sous les rapports de leur association locale dans les différents climats » (Humboldt (1805), cité par Acot (1988) p. 18. Elle vise notamment à comprendre les liens entre le climat et la composition des couverts végétaux. Augustin-Pyrame de Candolle, qui contribue également à l'essor de cette nouvelle discipline, indique qu'elle tire parti conjointement des progrès de la systématique, de la physiologie végétale et de la géographie physique. Comme le souligne Flahault en 1901, cette discipline a dû développer son propre vocabulaire pour pouvoir progresser. Selon lui, la nomenclature de la géographie des plantes porte sur deux types d'objet : les unités géographiques et topographiques d'une part, et les unités biologiques d'autre part. Les phytogéographes décomposent la lithosphère en grandes zones (froides, tempérées ou chaudes) en fonction de leur climat et de la végétation qui les recouvrent, qui se déploient *grosso modo* parallèlement à l'équateur. Puis ils les subdivisent selon les caractéristiques climatiques, topographiques et pédologiques, en régions, domaines, secteurs, districts, sous-districts et enfin stations. Ce terme « **station** », introduit par Wimmer en 1844, désigne selon Flahault (1901) (p. 262) une « circonscription d'étendue le plus souvent restreinte, représentant un ensemble complet et défini de conditions d'existence. La station (...) résume la combinaison des facteurs climatiques et géographiques avec les facteurs édaphiques²⁹ et biologiques, c'est-à-dire les rapports de chaque espèce avec le sol et avec les espèces auxquelles elle est associée. La disparition ou seulement la modification d'un élément (...) suffisent pour déterminer une différence de stations ». Ainsi, pour étudier

²⁹ Se dit d'un facteur ou d'une condition liée au sol, qui influence le développement et la croissance des végétaux et des animaux. Les exigences édaphiques d'une plante concernent donc les facteurs inhérents au sol et non pas ceux liés au climat ou à la morphologie. (*Larousse Agricole* 2002)

l'adaptation d'un ensemble de plantes à leur milieu, les écologues introduisent une unité d'analyse dont ils font l'hypothèse que les conditions physico-chimiques sont homogènes. Cette unité sera par la suite, dans les approches prenant en compte à la fois les plantes et les animaux, nommée le « biotope ». Déterminer de telles unités homogènes est indispensable pour pouvoir étudier les mécanismes d'adaptation des plantes à leur milieu. En ce qui concerne les unités biologiques, l'unité élémentaire qui peuple une station est l'« **association végétale**³⁰ » (voir Figure 6), un terme introduit par Humboldt en 1805, qui deviendra par la suite la « communauté végétale ». Il s'agit selon Flahault (1901, p. 263) de la « dernière expression de la concurrence vitale et de l'adaptation au milieu dans le groupement des espèces. Les habitants d'une même station ne sont pas seulement rattachés les uns aux autres par de simples relations de coexistence, mais encore par un lien d'intérêt réciproque (...) ». Les associations sont ensuite regroupées en groupes d'associations puis séries de groupes d'associations et enfin paysages végétaux ou types de végétation. Grâce à l'introduction de ces concepts, la géographie des plantes s'émancipe progressivement de la taxinomie pour mettre l'accent sur l'étude de la physionomie des plantes en fonction de leur adaptation aux conditions du milieu. Les phytogéographes introduisent d'ailleurs le concept physionomique et structurel de « forme de croissance », qui désigne l'état de la plante adaptée. Ils l'utilisent pour développer de nouveaux critères de classification des espèces végétales.

Peu à peu, la géographie des plantes, initialement focalisée sur les relations plantes-climat, évolue. C'est notamment grâce à l'apport d'Alphonse de Candolle qui suggère, dans sa *Géographie botanique raisonnée* de 1855, de réévaluer le rôle du climat dans la répartition des végétaux au profit de deux autres facteurs : l'historique des végétations antérieures et l'importance des roches sous-jacentes et des sols (Acot 1988). Les unités d'analyse que sont la « station » et l'« association végétale » permettent donc de décrire les relations entre les plantes et leur milieu, c'est-à-dire avec un ensemble de facteurs dépendant du climat, de la composition physique et chimique des sols, de l'altitude, etc. La géographie des plantes s'appuie alors de plus en plus sur d'autres disciplines, notamment sur la géologie. Lyell, dans ses *Principles of geology* parus en 1832, démontre l'immensité des temps géologiques, ouvre la voie au darwinisme mais aussi au développement de la paléobotanique, et par la suite à l'étude des mouvements de végétation qui marqueront le début de l'écologie.

³⁰ Nous signalons simplement un ensemble de débats sur la notion de « formation phytogéographique » introduite par Grisebach en 1838, dont la définition assez vague renvoie tantôt à la notion d'association, tantôt à celle de « forme biologique » développée par Warming par la suite, qui elle constituerait une sous-entité de l'association.

b. La naissance de l'écologie : modéliser les interactions pour comprendre les phénomènes de régulation

La désignation d'une nouvelle discipline reliant la tradition biogéographique à celles de l'économie de la nature et du darwinisme

Haeckel, disciple de Darwin, introduit le néologisme « **oecologie** » en 1866 pour désigner la « science des relations de l'organisme avec l'environnement, comprenant, au sens large, toutes les conditions d'existence ». Il en donne en réalité plusieurs définitions successives, dans un souci de lier la tradition biogéographique à celle d'économie de la nature, tout en faisant référence au darwinisme (Acot 1988) (p. 43): « *L'oecologie ou distribution géographique des organismes (...), [est] la science (...) de ce qu'on a appelé l'économie de la nature, les mutuelles relations de tous les organismes vivant en un seul et même lieu, leur adaptation au milieu qui les environne, leur transformation par la lutte pour vivre* ». Ainsi Haeckel propose une réorganisation des connaissances portant sur les relations entre êtres vivants et avec le milieu, au sein d'une nouvelle branche de la biologie non encore constituée, mais qui peu à peu prend son indépendance. On peut toutefois noter que deux pôles apparaissent dans la recherche en écologie : l'un sur les groupes d'organismes, qualifié de synécologie ; l'autre sur l'adaptation d'espèces données ou d'individus aux conditions du milieu, nommé autécologie.

Dès la fin du XVIII^e siècle, la distinction entre les « êtres organisés » et le « monde inorganique » s'était substituée à celle des trois règnes. Un siècle plus tard, Darwin, avec *l'Origine des espèces* (1876), apporte une vision généalogique de cette unité du monde vivant en défendant l'idée d'un ancêtre commun (Drouin 1991). C'est dans ce contexte qu'apparaît le terme de « biosphère » introduit par Suess en 1875. La biosphère « marque à la vie sa place au-dessus de la lithosphère ». Toutefois le principe de « solidarité entre les êtres vivants » est peu opératoire pour les écologues qui introduisent progressivement de nouvelles unités d'analyse pour désigner des systèmes plus localisés. C'est le cas du concept de « **biocénose** » (voir Figure 7) introduit en 1877 par Möbius. En étudiant le problème de l'épuisement de bancs d'huîtres au nord de l'Allemagne, le zoologue prend conscience de l'importance de ne pas seulement considérer le taux de fécondité de l'espèce étudiée, mais de prendre en compte aussi l'ensemble de ses relations avec les autres espèces qui vivent dans le même milieu (notamment dans le cas présent l'intensité de l'effort de pêche). Möbius justifie la nécessité du concept de biocénose ainsi : « la science ne possédait pas, jusqu'à présent, de mot par lequel (...) une communauté d'êtres vivants pût être désignée ; de mot désignant une communauté dans laquelle la somme des espèces et des individus, étant mutuellement limitée et sélectionnée par les conditions extérieures moyennes de vie, a par voie de reproduction continué à occuper un territoire donné ». Ainsi, la biocénose regroupe des espèces

animales et végétales inféodées à un milieu ; elle est donc délimitée géographiquement. En 1880, Stephen A. Forbes ne reprend pas le terme de biocénose, mais introduit le concept de « microcosme ». Il écrit : « un lac constitue un petit univers en lui-même, un microcosme au sein duquel toutes les forces élémentaires interviennent et où le jeu de la vie se déroule dans sa totalité mais à une échelle si petite que la pensée l'appréhende aisément ». Ce concept de microcosme désigne une entité biologique permettant d'analyser finement les relations entre les éléments physiques, la végétation et la faune d'un lac ; il annonce l'approche écosystémique.

Production de connaissances sur les relations dynamiques entre les plantes et leur milieu

Certains historiens tels que Acot (1988) soulignent que l'écologie en tant que nouvelle science n'émerge réellement qu'avec les travaux de Warming, qui publie en 1895 *Lehrbuch der Oekologischen Pflanzengeographie*. A cette époque, l'écologie végétale se développe beaucoup plus vite que l'écologie animale, notamment grâce aux avancées de la géographie des plantes. Warming distingue la géobotanique floristique (étude des facteurs limitant l'extension des espèces, genres, familles ; liée à la taxinomie) et la géobotanique écologique qui, elle, « nous enseigne comment les plantes et les communautés végétales ajustent leurs formes et leurs comportements aux facteurs [de leur environnement] effectivement agissants, tels que la quantité de chaleur, de lumière, de nourriture et d'eau qui se trouvent disponibles ».

Mais tandis que Warming s'intéresse à des phénomènes d'adaptation observés à un temps donné, c'est aux Etats-Unis, au tournant du XXe siècle, que McMillan, Cowles ou encore Clements, de l'Ecole dite de Chicago, développent une branche de l'écologie s'intéressant à la dynamique des associations végétales, en fonction du temps et des perturbations de leur environnement. Les écologues américains tentent en effet de répondre à des questions telles que « Comment les structures végétales sont-elles modifiées ? » ou encore « Quelles sont leurs origines ? ». Dans la lignée des travaux de paléobotanique développés au XIXe siècle, ils s'intéressent aux « **successions végétales** » (voir Figure 7), un terme emprunté à la géologie. Ce concept désigne un processus évolutif selon lequel une communauté constituée d'un ensemble de plantes vivant dans un même milieu subit l'action de ce milieu et le modifie en retour, ce qui favorise l'installation de nouvelles espèces. Le milieu n'est donc plus considéré comme un objet donné et immuable, mais un objet qui co-évolue avec les espèces qui y vivent. Ces interactions réciproques conduisent également à une certaine régulation du système.

Dès 1901, Clements indique en effet que « la végétation est essentiellement dynamique, mais du fait qu'elle réagit fortement sur l'habitat, elle montre une tendance constante à devenir statique ». Cette observation est à l'origine de la découverte de l'homéostasie des systèmes écologiques,

c'est-à-dire leur tendance à résister aux perturbations et à demeurer dans un état d'équilibre grâce à des phénomènes de rétroaction (Acot 1988). Clements développe le concept de « **climax** » (introduit auparavant par Cowles en 1899), qui sera structurant dans l'étude des dynamiques végétales. Le climax est défini comme « le terme final de l'évolution progressive de la végétation, dans l'hypothèse où cette végétation est à l'abri de toute action perturbatrice ou destructrice » (Clements cité par Drouin (1991) p. 161) ; il correspond à l'équilibre supposé le plus « mature » et le plus stable. Ces travaux sur les successions végétales contribuent à l'essor de l'écologie. Clements publie d'ailleurs en 1905 le premier ouvrage pédagogique en écologie, *Research methods in ecology*, qui propose une synthèse des théories américaines dans le domaine, ainsi que de nouvelles méthodes et de nouveaux instruments pour pouvoir mesurer les conditions du milieu (lumière, humidité...) et étudier les communautés (quadrats...).

L'élargissement aux espèces animales et à l'étude des réseaux trophiques

L'écologie animale est en plein essor dans les années 1920 et rattrape son retard sur la géobotanique en s'appuyant sur les concepts et méthodes de l'écologie des successions végétales (Acot 1988). Se développe alors une écologie des successions biotiques dans laquelle les communautés animales et végétales sont considérées ensemble au sein des « communautés biotiques », ce terme étant plus utilisé que celui de biocénose. Il est employé par Adams en 1904 qui étudie les végétations successives en fonction des conditions passées et présentes, ainsi que les différentes formes de vie animale qui y sont associées (*ibid.*). Toutefois, si au début du XXe siècle l'étude des communautés biotiques devient incontournable pour répondre à des préoccupations économiques telles que la mise en valeur des terres agricoles, la lutte contre les espèces nuisibles, ou la gestion des populations sauvages exploitées (*ibid.*), les écologues étudient soit l'évolution des communautés végétales en fonction des conditions du milieu, soit les dynamiques des populations animales influencées par leurs relations trophiques avec d'autres espèces, généralement alors sans tenir compte des facteurs abiotiques.

La structure des réseaux trophiques³¹ prend beaucoup d'importance dans les approches écologiques, notamment car les relations proies-prédateurs constituent l'un des plus importants mécanismes de régulation. Shelton, dès 1913, propose des représentations graphiques sous forme de « **réseaux trophiques** » (voir Figure 7); la vision des chaînes alimentaires linéaires devient obsolète (Acot 1988). Puis dans les années 1920 émergent les premières approches quantitatives pour prendre en compte les variations d'effectifs de populations au sein des communautés. Dès 1925, l'Américain Alfred J. Lotka et l'Italien Vito Volterra proposent indépendamment l'un de

³¹ Un réseau trophique est un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème, par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent.

l'autre une description mathématique des variations d'effectifs des populations animales. Ils marquent le début de l'application des mathématiques à l'écologie. Lotka travaille sur les épidémies paludiques liées aux populations d'anophèles³², et Volterra travaille sur la pêche (*ibid.*). Ils expriment par des équations différentielles le fait que la destruction d'une espèce par une autre peut entraîner des fluctuations numériques périodiques dans les populations des deux espèces. Leurs équations mathématiques sont alors très discutées, notamment par Gause qui les vérifie expérimentalement en 1935. Les approches mathématiques des dynamiques de populations se développent sans que soient pour autant abandonnées les approches empiriques (*ibid.*).

Les écologues mettent l'accent sur une analyse fonctionnelle des relations trophiques au sein des écosystèmes : Shelford (1931) contribue au développement de la notion d'« équivalence écologique » en soulignant qu'une espèce joue dans sa communauté biotique un rôle comparable à telle autre dans sa propre communauté. Elton assigne au concept de niche écologique un rôle purement fonctionnel et Gause modélise la structure d'une biocénose comme un « réseau complexe de niches écologiques » (Barbault 2008).

c. Le concept d'écosystème : rendre visibles les régulations écologiques cachées

L'écosystème, un concept permettant d'articuler l'écologie des successions végétales et l'étude des communautés biotiques

Clements développe au début du XXe siècle dans *Plant Succession* (1916) une théorie permettant de décrire la dynamique d'une communauté végétale, qui, partant d'un substrat nu, aboutit par un processus de succession de stades à un climax. Il compare alors la communauté végétale à un « organisme complexe » qui naît, vit et se développe grâce aux interactions entre les espèces qui la composent. Cette métaphore organiciste fait l'objet de vives polémiques (Acot 1988). C'est dans ce contexte que Tansley (1935) introduit le concept d'« **écosystème** » (voir Figure 7). Il critique tout d'abord la métaphore de l'organisme qu'il estime d'une part trompeuse car pour les biologistes, il renvoie à un individu (animal ou végétal) alors qu'il est employé par certains écologues pour sa portée philosophique : le mot « organisme » renvoie à une vision de l'univers où tout est en interaction (Whitehead, *Philosophy of Organisms*). D'autre part, il estime cette métaphore éclairante mais inappropriée lorsqu'on compare le développement d'une communauté à celui d'un organisme. Tansley distingue les *successions autogènes*, dans laquelle l'évolution de la communauté n'est due qu'à des facteurs internes, et les *successions allogènes*, perturbées par des facteurs externes (feu, surpâturage...), les deux types de facteurs pouvant coexister. En reprenant la théorie de Clements, il souligne que les successions autogènes évoluent vers un climax, alors

³² Le genre *Anopheles* regroupe 464 espèces de moustiques. Les espèces vectrices du paludisme appartiennent à ce genre.

que les successions allogènes peuvent « régresser » par rapport à cette évolution vers le climax. Or le développement d'un organisme ne régresse pas. Enfin, il critique surtout la vision holiste qui accompagne chez certains auteurs cette métaphore. Cette vision, introduite par Smuts en 1926, considère que « le tout est plus que la somme des parties : c'est ce qui donne une conformation et une structure particulière à chaque partie et qui organise également leur synthèse. Totalité et partie s'influencent et se déterminent réciproquement ; le tout est dans les parties et les parties sont dans le tout ». Le holisme justifie le fait d'étudier un « tout » comme une communauté biotique, mais suppose que l'association au sein d'une communauté est la cause des phénomènes dans lesquels sont impliquées les espèces qui la composent, ce dont Tansley doute. Selon lui, étudier chaque composante d'un organisme complexe et ses relations avec les autres peut permettre de prédire le comportement de cet organisme, au moins en théorie.

Tansley rejette également la notion de « communauté biotique » en affirmant qu'il ne voit pas sur quels critères des animaux et des végétaux disparates peuvent être considérés comme étant membres d'une même communauté s'ils n'ont pas de similarité. Cette notion lui paraît artificielle. De plus, pour comprendre l'évolution d'une communauté, il ne suffit pas de prendre en compte les interactions entre espèces, il faut aussi considérer celles entre les êtres vivants et les facteurs abiotiques. C'est pourquoi il lui semble indispensable d'intégrer systématiquement les facteurs abiotiques à l'unité écologique étudiée, et de considérer cet ensemble comme un système au sens physique. Tansley précise qu'un système est une unité isolée par la pensée pour être étudiée, sachant qu'il est en réalité compris dans d'autres systèmes et qu'il est lui-même composé de sous-systèmes : un atome, un individu, un écosystème ou encore l'univers sont des systèmes. Il souligne que « tous ces systèmes sont organisés, car c'est le résultat inévitable des interactions et ajustements mutuels de leurs composants ». En introduisant le concept d'écosystème, Tansley cherche donc à rendre visible un ensemble de régulations écologiques jusqu'à lors non prises en compte par les différents écologues. Il affirme :

« We have simply shifted our point of view and are contemplating a new entity, so that we now, quite properly, regard the totality of actions as the activity of a higher unit » (Tansley (1935), p. 299). L'écosystème lui paraît particulièrement intéressant à étudier en tant que tel, car lorsqu'il a un développement autogène, il évolue progressivement vers un haut niveau d'intégration, donc d'autonomie et peut atteindre un état d'équilibre dynamique.

L'écosystème vu comme unité fonctionnelle de base à travers l'approche énergétique

En introduisant la notion d'écosystème, Tansley appelle à l'intégration entre l'écologie végétale et l'écologie animale. Mais ce n'est que grâce au développement de l'approche énergétique, portant

sur les échanges de matière et d'énergie au sein des êtres vivants et avec l'environnement physico-chimique, que la synthèse sera vraiment réalisée. Acot (1988) souligne l'apport du limnologiste³³ Forel, qui, dans sa monographie sur la lac Léman (1892-1901), tente une première intégration des facteurs abiotiques aux biocénoses. Il analyse le passage de la matière vivante dans des incarnations successives à travers les chaînes alimentaires, puis la décomposition que les micro-organismes opèrent sur la matière organique pour la ramener à ses éléments les plus simples qui se dissolvent dans l'eau. Il décèle ainsi que les liens entre l'organique et l'inorganique sont structurés de manière circulaire et non linéaire. Toutefois il néglige l'importance de la photosynthèse comme processus de production primaire de matière organique (Acot 1988). Drouin (1991) mentionne l'importance de l'apport des travaux des chimistes tels que de Saussure, qui met en évidence que les plantes absorbent le carbone de l'air, Boussingault pour ses travaux sur la nutrition azotée des plantes, et Liebig, qui introduit la « loi du minimum » (la croissance d'un organisme est limitée par l'élément nutritif qui lui est offert en quantité minimale). Les progrès sur la nutrition minérale des plantes aident à faire le lien entre l'organique et l'inorganique. De plus grâce aux progrès de la chimie organique, Juday démontre en 1940 que l'on peut calculer des valeurs énergétiques en calories (5 650 cal/g de protéines), et qu'il est possible de n'utiliser qu'une seule unité pour mesurer les quantités de chaleur perçues dans un système écologique ainsi que les valeurs énergétiques de la biomasse de ce système. Dès lors, la structuration trophique de la biocénose peut être décrite en termes d'énergie (Acot 1988). Cette approche physicienne se prolongera dans les approches thermodynamiques puis cybernétiques des écosystèmes.

En 1941, le limnologiste Lindeman propose une approche nouvelle pour étudier un lac, autre que la description des groupements végétaux ou les successions. Il met l'accent sur « le lien entre, d'une part les relations trophiques, ou relations d'utilisations de l'énergie à l'intérieur de l'unité formée par la communauté, et, d'autre part, le processus de succession ». Lindeman s'inspire des travaux de Vernadsky sur les cycles biogéochimiques. Il décrit les relations entre les différents niveaux trophiques en convertissant en valeurs calorimétriques les poids moyens des différents groupes composant la biocénose (Acot 1988). Sa pensée peut être résumée à travers ces citations : « le processus fondamental de la dynamique des relations trophiques est le transfert d'énergie d'une partie de l'écosystème à une autre. (...) Une partie de l'énergie solaire est transformée, par le processus de la photosynthèse, en structures d'organismes vivants. (...) L'action combinée des animaux consommateurs et des décomposeurs bactériens tend à dissiper l'énergie potentielle des

³³ La limnologie est la science qui a pour objet l'étude de toutes les questions relatives aux eaux stagnantes (lacs, étangs, marais, ...), tant du point de vue physique que biologique

substances organiques en les retransformant en matière inorganique. Les plantes autotrophes peuvent à nouveau utiliser des matières nutritives dissoutes à cet étage inorganique, et resynthétisant des matières organiques complexes, achever ainsi le cycle trophique ». Il en conclut que l'écosystème, constitué d'êtres vivants et du milieu abiotique dans lequel ils vivent, doit être considéré comme « l'unité écologique la plus fondamentale ». Enfin, il généralise ses résultats aux écosystèmes terrestres.

Vers une modélisation des écosystèmes basée sur des principes de la théorie systémique, la thermodynamique et la cybernétique

- *L'approche systémique et la pensée holiste*

Les travaux de Lindeman confirment le besoin de changement de paradigme en écologie afin que le vivant et le milieu ne soient plus considérés comme des entités séparées. Cette avancée théorique, enrichie par le développement des approches mathématiques et de modélisation, va introduire un nouveau courant de l'écologie que l'on peut qualifier d'approche écosystémique. C'est notamment en puisant de nouvelles connaissances dans la thermodynamique et la théorie générale des systèmes naissante que les écologues vont développer de nouveaux modèles pour tenter de caractériser le fonctionnement des écosystèmes (Golley 1991). Ce sont les frères Eugène et Howard Odum qui vont impulser cette nouvelle dynamique de l'écologie. Leurs travaux sont tout d'abord influencés par ceux du biologiste Ludwig von Bertalanffy qui introduit la notion de « système ouvert » en 1937 : il s'agit d'un système qui, à travers ses échanges de matière, d'énergie et d'information, manifeste la capacité de s'auto-organiser³⁴. A travers sa théorie générale des systèmes, il tente de promouvoir « une nouvelle philosophie de la nature » afin de sortir du paradigme analytique et mécaniste de la science classique et ainsi privilégier une vision du « monde comme une grande organisation ». Bertalanffy est en effet imprégné d'une vision holiste que revendiquera également Eugene Odum.

Les principes majeurs de la théorie générale des systèmes sont les suivants:

- Principe d'interaction et d'interdépendance : Un système ne peut être compris sans faire l'étude des interactions entre ses parties. Celles-ci prises isolément ne se comportent pas de la même manière que lorsqu'elles sont intégrées dans un ensemble
- Principe de totalité : les phénomènes ne se réduisent pas à des événements locaux. Ils appartiennent à un tout qui est supérieur à la somme des parties
- Principe de rétroaction ou causalité circulaire³⁵

³⁴ Par distinction, un système fermé échange uniquement de l'énergie avec son environnement.

³⁵ Par différence avec la causalité linéaire qui fait référence à une chaîne d'événements où A entraîne B ; B entraîne C ; C entraîne D ; etc., la causalité circulaire implique une chaîne d'événements où A entraîne B ; B entraîne C ; mais C renvoie à A.

- Principe d'équifinalité : dans un système ouvert, le même état final peut être atteint à partir de conditions initiales différentes ou par des chemins différents.

Le principe de totalité renvoie à la pensée holiste, qui s'oppose au réductionnisme dans le sens où un système complexe est considéré comme une entité possédant des caractéristiques liées à sa totalité, et des propriétés non-déductibles de celles de ses éléments, qui sont qualifiées de propriétés émergentes³⁶. Ces propriétés émergentes permettraient donc de distinguer les différents niveaux d'intégration (Blandin 2007). Ainsi l'écologie considère que le vivant est constitué de divers systèmes emboîtés, allant de l'atome à l'univers, que l'on peut isoler conceptuellement pour étudier des situations complexes. Toutefois, tous les systèmes sont interdépendants : à chaque niveau les composants se combinent pour produire un ensemble de fonctions élargies et ne peuvent survivre seuls.

- *Le fonctionnement des écosystèmes vu à travers les principes de thermodynamique*

Le physicien Schrödinger s'appuie sur la conception de système ouvert de Bertalanffy pour introduire la thermodynamique du vivant en 1945. Il se pose la question de savoir pourquoi, contrairement aux systèmes physiques, les organismes vivants peuvent désobéir au second principe de thermodynamique, qui indique qu'un système isolé évolue spontanément vers un état d'équilibre qui correspond à l'entropie maximale, c'est-à-dire au plus grand désordre (Acot 1988). Il introduit le concept d'entropie négative (rebaptisé « néguentropie » par Brillouin) pour expliquer la présence de « l'ordre » à l'intérieur des êtres vivants. Une cellule, par exemple, tend à maintenir une entropie négative, liée à son organisation et à son fonctionnement, et cela grâce à la consommation d'énergie venant de l'extérieur de la cellule. Une cellule morte n'entretient plus cette néguentropie, donc se désagrège. Cette notion de néguentropie est rejetée par l'économiste Georgescu-Roegen qui souligne que d'après le second principe de thermodynamique énoncé par Carnot, l'entropie est soit positive soit nulle.

Hutchinson et les frères Odum furent les premiers à considérer que les écosystèmes se comportent, sur le plan thermodynamique, comme des êtres vivants (Barbault 2008) : « Les organismes vivants, les écosystèmes et la biosphère tout entière possèdent la caractéristique thermodynamique essentielle d'être capable de créer et de maintenir un état d'ordre interne ou de basse entropie ». La publication en 1953 de *the Fundamentals of Ecology* d'Eugene Odum va d'ailleurs modifier le paysage scientifique de l'écologie. Les frères Odum donnent une nouvelle définition à l'écosystème : « *Any unit that includes all of the organisms in a given area interacting with the*

³⁶ Salt (1979) suggère de distinguer les propriétés émergentes des propriétés collectives. Selon lui, les premières sont liées aux interactions entre les organismes ; on ne peut donc pas les prédire en étudiant ces derniers séparément, tandis que les propriétés collectives correspondent à la somme des comportements des composants.

physical environment so that a flow of energy leads to a clearly defined trophic structure, biotic diversity and material cycles within a system is an ecological system (ecosystem) ». Howard Odum³⁷ se consacre plus particulièrement à l'analyse des flux d'énergie au sein des écosystèmes, en faisant l'analogie avec les circuits électriques. Il postule que les transferts d'énergie dans les écosystèmes sont conduits par une « écoforce » analogue au voltage des circuits électriques.

- *L'influence de la cybernétique pour analyser les processus d'autorégulation*

Par ailleurs, le développement de la cybernétique porté par Wiener (1948) va également fortement influencer les nouvelles modélisations des écosystèmes (Acot 1988). Cette discipline s'inspire des théories de l'information et de la communication et les applique aux phénomènes de régulation chez l'animal ou la machine. Elle aide ainsi à comprendre comment les systèmes vivants évoluent de façon relativement stable dans le temps, malgré les perturbations fréquentes auxquels ils sont soumis. Son concept central est celui de « rétroaction », qui permet l'équilibration des systèmes (*ibid.*). La cybernétique se concentre sur la description des relations entretenues avec l'environnement. Elle nécessite d'identifier les structures communicantes de l'objet étudié en se concentrant exclusivement sur l'effet externe, sans considérer les raisons internes de ces effets d'où la schématisation en boîte noire. Chaque boîte noire n'est considérée que sous l'aspect de ses entrées et de ses sorties. Il se forme une boucle de rétroaction lorsque la grandeur de sortie d'une boîte noire réagit sur la grandeur d'entrée, selon un processus de bouclage. Dans ce cas, une causalité non-linéaire se substitue à une simple relation de cause à effet. Il existe deux sortes de rétroactions : la rétroaction positive (effet amplificateur) et la rétroaction négative (effet compensateur). Le rôle de la cybernétique est de prévoir l'évolution du comportement de l'objet modélisé dans le temps. En écologie, les relations proies-prédateurs peuvent être considérés comme des phénomènes de rétroaction « négatives », car si la quantité de proies d'un prédateur augmente, celui-ci bénéficie de conditions meilleures pour sa reproduction, donc augmente la prédation, ce qui entraîne une diminution des proies donc un retour aux conditions initiales —on retrouve ici les travaux de Lotka et Volterra (*ibid.*).

La cybernétique s'appuie sur la théorie de l'information de Claude Shannon(1949), une théorie probabiliste permettant de quantifier le contenu moyen en information d'un ensemble de messages, dont le codage informatique satisfait une distribution statistique précise. Une caractéristique majeure de cette théorie est de donner à la notion d'information un statut physique à part entière. Le principe est qu'une information abandonnée à elle-même ne peut évoluer que dans le sens de sa désorganisation, c'est-à-dire l'accroissement d'entropie. Elle subit de fait, dans

³⁷ Howard Odum fut comme Lindeman l'un des disciples de G. E. Hutchinson à l'Université de Yale.

ses transformations (codage, transmission, décodage, etc.), une dégradation irréversible. Shannon montre l'équivalence de cette notion avec l'entropie de Boltzmann en thermodynamique.

Toutefois l'approche cybernétique des écosystèmes fait débat : Engelberg et Boyarsky (1979) estiment que les écosystèmes ne sont pas cybernétiques car ils ne disposent pas d'un réseau d'information qui permettrait de diriger les flux. Ils ajoutent que s'il y a bien des échanges d'énergie et de matière, ils ne sont pas selon eux forcément liés à de l'information et ne sont pas orientés vers un objectif déterminé. Cependant il semble que les réactions académiques suite à l'article d'Engelberg et Boyarsky ont plutôt convergé vers la qualification des écosystèmes de systèmes cybernétiques, ou encore d'unités en coévolution. Patten et Odum (1981) cités par (Blandin 2009) considèrent en effet que les facteurs, processus et interactions (gravité, conservation, dissipation, facteurs limitants, phéromones, etc.) constituent un réseau d'information régulant les flux de matière et d'énergie.

- *La modélisation des écosystèmes comme entités capables d'autorégulation*

Selon l'approche systémique, au niveau fonctionnel, un système comprend :

- des flux de matériaux, d'énergie ou d'informations, qui empruntent les réseaux de relations et transitent par les stocks. Ils fonctionnent par entrées/sorties (ou inputs/outputs) avec l'environnement ;
- des centres de décision qui organisent les réseaux de relations, c'est-à-dire coordonnent les flux et gèrent les stocks ;
- des boucles de rétroaction qui servent à informer, à l'entrée des flux, sur leur sortie, de façon à permettre aux centres de décision de connaître plus rapidement l'état général du système ;
- des ajustements réalisés par les centres de décisions en fonction des boucles de rétroaction et de délais de réponse.

La fonction première d'un système est sa propre conservation. Or, une des caractéristiques des systèmes qui « fonctionnent » est qu'ils sont tous dans un état de déséquilibre thermodynamique, dans la mesure où ils ne cessent d'échanger de l'énergie avec leur environnement. Dans le cas des animaux, les conditions internes sont nombreuses et dépendent de sous-systèmes (maintien de la température interne, de la pression artérielle, de la teneur en eau et autres substances vitales, etc.). Théoriquement, un système parfaitement autorégulé impliquerait de pouvoir revenir à son état initial, suite à une perturbation. Cependant les êtres vivants ne reviennent jamais à un état identique : ils évoluent vers un état légèrement différent ; la stabilité n'exclut donc pas une certaine évolution. Ainsi, les écologues cherchent à déterminer les mécanismes d'équilibration au

sein des écosystèmes et à prédire leur évolution en fonction notamment des perturbations externes. Pour ne pas rester à un niveau descriptif, ils développent la quantification des facteurs retenus à travers des équations mathématiques et des calculs statistiques, qui prolongent les travaux d'avant-guerre sur la dynamique des populations.

L'écosystème est avant tout une construction intellectuelle (Blandin 2007), même s'il est aujourd'hui utilisé pour désigner des entités physiques. Sa définition est large, si bien que le concept donne lieu à de nombreuses modélisations différentes, en fonction des approches et théories mobilisées d'une part, nous venons de le voir, mais aussi en fonction des objets étudiés (Pickett and Cadenasso 2002). Ces objets peuvent concerner l'énergie et/ou les nutriments (processus, circulation de flux dans les réseaux trophiques, évaluations quantitatives...) ; les organismes (la biodiversité, espèces clé de voûte, groupes fonctionnels...), ou encore les interactions homme-écosystème (services écosystémiques, institutions...). Ces modélisations impliquent une délimitation généralement arbitraire, que ce soit en termes d'échelle, de temps, de composants, de limites, de contraintes, etc.

La trajectoire des connaissances en écologie montre que cette discipline s'est toujours intéressée aux interactions entre les êtres vivants, et avec leur environnement et a produit des modèles de plus en plus sophistiqués pour pouvoir les étudier, les évaluer et les prédire. Comment de tels progrès peuvent-ils aujourd'hui soutenir un renouvellement des raisonnements de conception en agronomie ?

2. Une interprétation de la crise environnementale de l'agriculture : d'une crise des savoirs à une crise de l'action

a. La crise des savoirs en agronomie

La généalogie des modèles de l'écologie que nous avons présentée nous conduit à identifier un certain nombre de variables permettant d'analyser des phénomènes écologiques progressivement rendus visibles par les écologues (voir Tableau 1).

Sous-discipline de l'écologie	Variable observée	Phénomène modélisé
Géographie des plantes (XIX ^e siècle)	Traits morphologiques ou physiologiques d'espèces ou de communautés de plantes	Répartition des plantes en fonction de leur capacité d'adaptation au milieu et aux autres espèces de plantes vivant dans ce milieu
Ecologie végétale (début XX ^e siècle)	Interactions plante-plante et plante-milieu	Stabilité de la communauté
Ecologie animale (début XX ^e siècle)	En plus des caractéristiques intrinsèques de la population, prise en compte des relations aux autres êtres vivants et au milieu	Dynamiques de populations dans un milieu/territoire donné (présence, absence, croissance...)
Approche écosystémique (2 ^e moitié XX ^e siècle)	Flux d'énergie et de matière dans l'écosystème et avec l'extérieur Boucles de rétroaction	Régulation, fonctionnement de l'écosystème, production

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux modèles de l'écologie répertoriés dans la généalogie du Chapitre II

Or dans la conception agronomique beaucoup de ces phénomènes écologiques ont progressivement été négligés. En effet, jusqu'aux années 1970, et même encore aujourd'hui, à force de confiner ses objets et de réduire leur échelle pour les optimiser, l'agronomie ne « voit » plus un certain nombre de régulations écologiques. Pour faire face à la crise environnementale rencontrée par l'agriculture, l'agronomie doit prendre à nouveau en compte ces régulations, et doit pour cela mobiliser des connaissances qui aujourd'hui lui manquent. L'agriculture est donc confrontée depuis les années 1980 à une « crise des savoirs » concernant les processus écologiques qu'elle doit surmonter pour pouvoir concevoir de nouveaux moyens d'action.

Le plan Ecophyto 2018 est un bon exemple de cette crise des savoirs. Une étude de l'INRA intitulée Ecophyto R&D - Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? (Butault *et al.* 2010) mentionne un certain nombre de stratégies et de scénarios pour diminuer l'usage des pesticides notamment dans les grandes cultures : la diversification des cultures, le désherbage mécanique et le travail du sol, la lutte biologique, l'utilisation de variétés rustiques, les associations végétales, etc. Mais cette étude souligne que « la reconception de systèmes de culture combinant plusieurs techniques préventives pour réduire fortement les risques de bioagresseurs est peu abordée », notamment en raison de « l'insuffisance des références agronomiques et des garanties de performances qu'elles offrent pour l'agriculteur, les difficultés de la mise en place d'organisations

collectives au niveau des territoires, alors que celles-ci sont indispensables au déploiement de certaines solutions préventives (...) » (p. 84). De telles solutions demandent en effet de prendre en compte les interdépendances complexes entre les acteurs (sélectionneurs, chercheurs et instituts techniques, acteurs des filières, agriculteurs...). L'étude souligne ainsi qu'il est « nécessaire d'agir sur l'ensemble du système socio-technique, et pas seulement sur des incitations ou taxes adressées aux seuls agriculteurs » (p. 85). Dans ce contexte les attentes à l'égard de la recherche publique pour une production accrue de connaissances et de références expérimentales sur des systèmes innovants sont fortes.

Diverses initiatives sont déployées depuis une trentaine d'années pour réintégrer dans la conception agronomique des savoirs de l'écologie ; nous allons les mentionner dans ce qui suit. Mais avant cela, nous soulignons les spécificités des connaissances en écologie qui rendent complexe leur mise en convergence avec les logiques de l'agronomie.

b. Un paradoxe : des connaissances en écologie qui mènent d'une crise des savoirs à une crise de l'action

La généalogie des modèles de l'écologie présentée nous a permis de mettre en évidence une posture longtemps « compréhensive » de l'écologie, c'est-à-dire visant à observer, décrire, comprendre et parfois quantifier les processus écologiques. Deux phénomènes majeurs sont d'ailleurs ciblés à travers l'étude des interactions entre les êtres vivants et avec leur milieu : (i) la répartition des plantes et des animaux sur la terre, et (ii) les phénomènes de régulation qui conduisent à une certaine stabilité des communautés d'êtres vivants. L'approche thermodynamique et cybernétique des écosystèmes développée par les frères Odum consolide la notion d'équilibre écologique et de climax mise en avant par les géobotanistes. Selon Golley (1991) (p. 137), « les écologues écosystémistes, avec leur vision d'un système naturel équilibré et harmonieux, ont contribué à fonder une tradition intellectuelle et une culture populaire occidentales largement répandues ». Dans cette vision, un écosystème évolue normalement vers un équilibre « thermodynamiquement viable et cybernétiquement régulé ». Blandin (2009) (p. 38) souligne qu'« il y a là, implicite, l'idéologie d'un état parfait des communautés vivantes, état d'équilibre en adéquation totale avec l'environnement physique ». Les changements globaux, dus aux bouleversements climatiques ou à l'impact des activités humaines notamment sur la biodiversité, sont alors considérés comme des perturbations externes négatives qui déséquilibrent les écosystèmes.

Les connaissances de l'écologie ne sont pas tournées vers la transformation de ces systèmes, elles ne sont pas produites dans une logique de conception. Il semble même à première vue que ces

connaissances ont plutôt tendance à limiter l'action. Cette posture compréhensive, essentiellement liée à des travaux sur des écosystèmes peu perturbés par l'homme, a d'ailleurs influencé les mouvements environnementalistes en plein essor à partir des années 1970, plutôt en faveur de logiques de conservation de la nature et non pas de gestion des écosystèmes. La notion de climax introduit une idée de norme utilisée par exemple pour mesurer des distorsions dues aux activités humaines. Blandin (2009) souligne que la pensée évolutionniste soutient paradoxalement l'idée de stabilité et d'équilibre optimal. En effet dans la perspective où « l'écosystème est conçu comme un assemblage d'espèces parfaitement ajustées les unes aux autres et interagissant de telle sorte que l'équilibre du système soit assuré », l'évolution apparaît « comme le processus ayant, par le jeu de la sélection naturelle, mis en place des espèces coadaptées de façon optimale ». Ainsi l'évolution entraînerait-elle la sélection des écosystèmes les mieux intégrés, donc les plus stables. L'idée d'un équilibre de la nature perturbé par l'homme est d'ailleurs au cœur des réflexions de la première conférence technique organisée en 1949 à Lake Success, USA, par l'Unesco et l'UIPN (Union internationale pour la protection de la nature, nouvellement créée). Blandin (2009) mentionne qu'il s'agit de la première rencontre entre la protection de la nature en tant que préoccupation sociétale et l'écologie en tant que science. Jean-Paul Harroy, premier secrétaire de l'UIPN, écrit dans l'introduction des actes de la conférence : « Principalement dans l'observation des équilibres biologiques, le naturaliste, surtout s'il ambitionne d'intervenir dans ces équilibres si labiles, doit s'imprégner du principe que tout est dans tout et que la modification brusque de l'incidence de l'un des facteurs en jeu ne peut que comporter pour l'ensemble du complexe des répercussions profondes, même si son imagination ne lui permet pas *a priori* de les prévoir » (cité par Blandin (2009) p. 36).

Ainsi, avec la notion d'écosystème, l'écologie semble mener l'agronomie d'une « crise des savoirs » à une « crise de l'action » : d'un côté elle met en évidence l'importance de reconnaître le fonctionnement complexe des écosystèmes et révèle un ensemble de régulations négligées dans les modèles de l'agronomie, d'un autre elle souligne l'impossible maîtrise des conséquences des actions de gestion sur les écosystèmes. Or comment rendre possible l'action ? Comment engager une posture de conception des écosystèmes anthropiques qui prenne en compte leur fonctionnement et leurs contraintes, de manière à pouvoir les maintenir et les protéger ? Depuis plusieurs décennies, de nouvelles connaissances en agronomie et en écologie tendent à surmonter des crises des savoirs et de l'action en introduisant des concepts et des modes de raisonnements nouveaux. Nous allons voir à présent les avancées accomplies et identifier les difficultés qui restent à traiter.

Chapitre III. La conception des agro-écosystèmes, une nouvelle perspective ?

1. L'agro-écosystème : un point aveugle de l'agronomie et de l'écologie

L'agro-écosystème, ou écosystème cultivé, semble être un oxymore : d'un côté il évoque un système vivant caractérisé par un auto-fonctionnement, des mécanismes de régulation complexes, d'un autre il évoque une gestion intensive par l'homme, orientée quasiment exclusivement vers la production agricole.

a. L'occultation progressive de l'écosystème dans la conception agronomique

Jusque dans les années 1980, les systèmes de conception de l'agronomie ont progressivement confiné et découplé les objets de conception, pour aboutir à la parcelle, voire à la plante en relation avec le sol et l'air, et ils ont organisé l'essentiel de la conception sur des techniques élémentaires de production. L'agronomie a concentré ses capacités de modélisation sur des régulations apparaissant comme essentielles au processus de production. Par conséquent, de nombreuses régulations écologiques en ont été exclues, et l'écosystème a disparu des raisonnements de conception. De même, si depuis plusieurs décennies, des modèles alternatifs de production émergent pour tenter de remédier aux dommages causés par l'agriculture sur l'environnement, la plupart ne remettent pas en cause la décision à l'échelle individuelle. Les décisions sont essentiellement prises par les agriculteurs individuellement, à l'échelle de leur exploitation. Aujourd'hui, l'écosystème cultivé n'apparaît pas comme un objet de conception.

b. L'absence de l'écosystème cultivé dans les travaux de l'écologie

Le développement de l'écologie n'est pas étranger à celui de l'agronomie à bien des égards. Ainsi, la lutte biologique, pratiquée depuis des millénaires pour protéger les cultures, a contribué au développement théorique de l'écologie et en a constitué une application pratique. Par ailleurs les travaux développés par les chimistes du XVIII^e et XIX^e siècles ont permis des avancées considérables à la fois sur la compréhension du fonctionnement des écosystèmes et sur l'amélioration du maintien de la fertilité dans les champs cultivés.

A partir des années 1920, l'Italien Azzi (1922) propose le développement d'une « écologie agricole » visant à étudier les relations entre les caractéristiques physiques de l'environnement, du climat et du sol, et le développement des plantes agricoles, de manière à mieux adapter les cultures à leur milieu. Mais cette initiative n'incite pas d'emblée les écologues à étudier les milieux

cultivés. Cela peut s'expliquer par le fait que la notion de climax, portée par l'étude des successions végétales mais aussi par l'approche écosystémique initiée par Lindeman puis Odum, incite les écologues à travailler surtout sur des paysages peu transformés par l'homme. Or comme le souligne Acot (1988), l'agriculture va souvent à l'encontre des dynamiques écologiques : elle entraîne une régression du nombre d'espèces présentes dans la zone cultivée donc du nombre d'espèces animales, et par conséquent diminue les mécanismes homéostatiques. Ces phénomènes sont amplifiés dans les systèmes de monocultures qui entraînent des pullulations de ravageurs ou encore la destruction des adventices qui constituent une ressource alimentaire pour de nombreuses espèces animales. Cette contradiction entre dynamique naturelle des écosystèmes et artificialisation liée à l'agriculture a contribué à ce que l'agronomie et l'écologie évoluent globalement de façon parallèle, notamment dans la première moitié du XXe siècle.

2. De nouveaux concepts qui tournent l'écologie vers la gestion des milieux cultivés

Cependant la montée en puissance de la notion de développement durable a progressivement conduit les écologues à adopter une nouvelle posture visant à proposer des outils et méthodes pour mieux gérer les systèmes écologiques. En s'intéressant à des milieux transformés par l'homme, l'écologie se tourne en partie vers une démarche de production de connaissances pour l'action, notamment pour contribuer à la conception de nouveaux systèmes de production agricole. Elle introduit notamment de nouveaux concepts qui donnent prise à l'action.

a. De l'équilibre à la trajectoire des écosystèmes

Dès la conférence de Lake Success en 1949, certains intervenants soulignaient déjà leurs réserves vis-à-vis de la notion d'équilibre de la nature (Blandin 2009). Ainsi, Ira N. Gabrielson écrivait : « le terme « équilibre de la nature » tel qu'il est généralement admis, a peu de sens pour moi. (...) Toute mon expérience de terrain indique qu'il y a en permanence un changement d'ajustement entre compétiteurs au sein des communautés écologiques. Ces ajustements basculent parfois violemment dans un sens ou dans un autre, sans interférence humaine. Aussi l'« équilibre de la nature », si tant est que cela signifie quelque chose, c'est un équilibre excessivement dynamique qui ne se maintient jamais mais bouge constamment » (Gabrielson (1950), cité et traduit par Blandin (2009)). Le débat entre l'idée de stabilité des écosystèmes et celle de modifications dynamiques perpétuelles est posé.

Au cours du XXe siècle, les écologues introduisent divers concepts pour explorer cette notion d'équilibre qui semble être au cœur des préoccupations écologiques. Un premier concept est celui

de stabilité. Dès les années 1950, on s'interroge sur la relation entre diversité spécifique et stabilité des écosystèmes. Cette relation a longtemps été explorée avec l'idée qu'une plus grande diversité spécifique devrait garantir une plus grande stabilité des écosystèmes. Cependant cette hypothèse fait encore débat aujourd'hui : si elle est assez intuitive, elle n'a pas encore été prouvée empiriquement. Un autre concept est celui de résilience. Introduit par Holling (1973), ce concept s'inscrit dans une volonté de comprendre ce qui permet aux systèmes écologiques de subir d'importants changements sans perdre l'intégrité de leurs fonctions.

D'autres approches, notamment la paléoécologie, estiment que les écosystèmes n'évoluent pas vers un équilibre donné, mais suivent plutôt une **trajectoire** temporelle dans un contexte général de changement et de perturbations (Blandin 2009). Cette trajectoire est le résultat à la fois d'interactions entre des espèces, des structures écologiques et des activités humaines. Au sein de ces trajectoires, la fréquence et l'amplitude des perturbations sont plus ou moins élevées. Les périodes de stabilité seraient selon les écologues plus favorables à l'adaptation mutuelle des composantes des écosystèmes. Ainsi les perturbations ne sont pas forcément considérées comme des catastrophes qui retardent l'atteinte du climax par l'écosystème, mais comme des étapes dans le déroulement d'une histoire.

Cette notion de trajectoire est intéressante d'un point de vue de gestion des écosystèmes car elle donne prise à l'action. De nouvelles questions apparaissent : comment les actions de l'homme peuvent influencer une trajectoire souhaitable de l'écosystème ? Quels sont les critères d'évaluation et les moyens de contrôle d'une telle trajectoire ? Comment peut-on par exemple évaluer sa robustesse ?

b. De l'écosystème au paysage hétérogène : un nouveau concept pour donner prise à l'action ?

Dans la modélisation des écosystèmes initiée par Tansley et Lindeman, puis développée par Odum, le milieu physico-chimique est considéré comme homogène. Cette représentation de l'écosystème était d'ailleurs tirée essentiellement d'études de lacs. Depuis, pour beaucoup d'écologues, l'écosystème est vu comme un système d'interactions « contenu » dans un milieu physique plutôt que comme une entité indissociablement physique et biologique (Blandin 2007). Le milieu physique n'est alors pas vraiment considéré comme un lieu mais plutôt comme un ensemble de facteurs représentés par des variables de forçage dans un modèle (*ibid.*). Cette représentation est critiquée depuis longtemps par les géographes : Blanc-Pamard, cité par Blandin (2007) écrivait ainsi en 1982 : « l'écosystème n'a ni de dimension spatiale, ni historique, ni dynamique ». Cette représentation du biotope comme homogène n'est pas problématique tant

qu'on s'intéresse aux flux circulant entre le milieu physico-chimique et l'ensemble des êtres vivants. Mais lorsque l'on s'intéresse aux dynamiques des populations au sein d'écosystèmes terrestres, cette hypothèse ne tient plus.

Partant de ce constat, une nouvelle branche de l'écologie émerge au début des années 1980 : l'écologie du paysage. Selon Blandin (Blandin and Bergandi 1997), cette discipline s'enracine dans les travaux du géographe Carl Troll qui cherche à combiner la géographie et l'écologie. Troll considère le paysage comme une entité spatiale propre à l'espèce humaine, qui intègre la géosphère, la biosphère et la noosphère³⁸. Dans ce cadre le paysage devient la traduction spatiale de l'écosystème. Forman et Godron (1986) le définissent ainsi :

Landscape is "a heterogeneous area composed of a cluster of interacting ecosystems that are repeated in a similar manner throughout".

Selon Blandin (1997), la conception de ces auteurs privilégie l'échelle spatiale en son sens le plus restreint plutôt qu'un niveau d'organisation des structures écologiques, mis à part le fait que les écosystèmes sont considérés comme des « briques » constitutives du paysage. Pour le géographe Bertrand, « le paysage est un média entre la nature et la société ayant pour base une portion d'espace matériel qui existe en tant que structure et système écologique, donc indépendant de la perception. La notion de paysage permet donc d'étudier des échelles spatiales plus larges et de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale, mais aussi l'action de l'homme sur le milieu. Ainsi, Burel et Baudry (1999) en proposent cette définition : « le paysage est un niveau d'organisation des systèmes écologiques, supérieur à celui de l'écosystème ; il se caractérise essentiellement par son hétérogénéité et par sa dynamique gouvernée en partie par des activités humaines » (Burel and Baudry (1999), p. 43). Pour ces écologues, l'échelle du paysage peut couvrir une gamme allant de quelques hectares à quelques centaines de km² et doit pouvoir répondre à la question de la perception humaine, ainsi que de la prise en compte d'activités humaines et de processus écologiques. L'écologie du paysage s'intéresse particulièrement aux milieux cultivés, étant donné l'emprise de l'agriculture sur les écosystèmes, son rôle dans le façonnement des paysages et la montée en puissance des préoccupations environnementales.

Cette nouvelle approche conduit à considérer différemment les perturbations, facteurs de la dynamique des écosystèmes pouvant être d'origine abiotique (tempêtes, incendies, éruptions volcaniques, inondations...), biotique (épidémies, invasions de ravageurs...) ou anthropique (agriculture, exploitation forestière, urbanisation...) (Burel and Baudry 1999). Les perturbations

³⁸ Ensemble des artefacts humains

ne sont plus seulement vues comme exogènes et négatives, mais elles sont étudiées sous l'angle de leur rôle dans la structuration des écosystèmes. L'hétérogénéité perçue à un moment et un endroit donnés est en effet la résultante des contraintes environnementales, des processus écologiques et des perturbations naturelles ou anthropiques (*ibid*). L'hétérogénéité du milieu crée une variété de niches écologiques et par conséquent est source de biodiversité. Amoros et Wade (1993 – cités par Blandin (2009) soulignent que « la présence simultanée, dans un même secteur, de communautés correspondant à tous les stades des différentes successions [permet] aux espèces correspondantes de trouver toujours quelque part dans le secteur considéré les conditions d'habitat qui leurs sont propices, donc de se perpétuer malgré les transformations incessantes des écosystèmes. Il en résulte une diversité floristique et faunistique maximale, et supérieure à la diversité des seuls stades climax des successions ».

L'hétérogénéité, tant spatiale que temporelle, prend un statut conceptuel (Blandin 2009). Selon les écologues du paysage, elle contrôle de nombreux mouvements et flux d'organismes (animaux et plantes), de matière (nutriments, polluants, eau...) et d'énergie (Burel and Baudry 1999). La mosaïque paysagère est reconnue comme un ensemble spatialement hétérogène. L'hétérogénéité a deux composantes : la diversité des éléments du paysage et la complexité de leurs relations spatiales. Les écologues du paysage cherchent donc à comprendre les déterminants de cette hétérogénéité, et son rôle dans le maintien d'une diversité d'espèces.

Quelques principes de l'écologie du paysage

Les écologues du paysage s'intéressent à l'« effet paysage », qui « nécessite de comprendre les relations qui connectent les écosystèmes, formant un système écologique en soi, donc caractérisé par des propriétés émergentes spécifiques » (Burel and Baudry 1999). Toutefois, pour mener une analyse, les écologues se réfèrent généralement à l'effet du paysage sur une ou un petit nombre d'espèces dont ils peuvent connaître la présence, le déplacement, la survie ou la reproduction. Ils cherchent donc à identifier les habitats favorables ou acceptables par cette/ces espèces (*ibid.*). Pour pouvoir prendre en compte simultanément plusieurs espèces, les écologues ont introduit la notion de groupes fonctionnels³⁹ (Lavorel *et al.* 1998), selon les traits particuliers d'histoire de vie des espèces comme leur mode de locomotion ou leur stratégie alimentaire ou reproductive.

Forman et Godron (1981, cités par Burel et Baudry (1999) p. 71) proposent de distinguer les éléments suivants pour décrire un paysage : la matrice est l'élément dominant, au sein duquel on distingue des taches (patches en anglais) tels que les bosquets, et des corridors qui sont des éléments linéaires. L'ensemble des taches constitue une mosaïque et l'ensemble des corridors un réseau. Burel et Baudry (1999) soulignent que d'une part ces éléments sont essentiellement visuels et doivent être caractérisés selon leurs modes de gestion ou les processus physiologiques, d'autre part la notion de matrice comme espace indifférencié, neutre ou hostile est peu opportun dans les écosystèmes terrestres. Par conséquent à ce terme est préféré celui de mosaïque paysagère. Les aspects fonctionnels du paysage sont liés à la nature, la taille, l'agencement et la connectivité des « taches » du paysage. L'accent est mis également sur le rôle des interfaces entre différents milieux (écotones) sur la diversité biologique ; la quantité et les types d'interfaces étant une mesure de l'hétérogénéité.

La structure du paysage est constituée du parcellaire agricole et forestier, des éléments fixes du paysage (haies, arbres...), de la topographie, des infrastructures humaines (habitations, routes...), des configurations relatives des écosystèmes terrestres et aquatiques et de la localisation dans un bassin-versant, par rapport au littoral... La distinction entre éléments pérennes (haies, prairies...) et milieux perturbés (cultures annuelles) est également centrale pour décrire des qualités d'habitat écologique. L'habitat est un ensemble de taches qu'un organisme peut utiliser. Lorsque ces taches sont de petite taille et dispersées, l'habitat est dit fragmenté. Les espèces sont plus ou moins sensibles à la fragmentation en fonction de leur capacité de déplacement (distance pouvant être parcourue) et de leur échelle d'activité (Burel and Baudry 1999). La connectivité spatiale est le fait que deux taches sont adjacentes, et la connectivité fonctionnelle est le fait que des individus puissent passer d'une tache à l'autre même si ces dernières sont éloignées (Baudry and Merriam, 1988, cités par Burel and Baudry (1999) p. 77). L'échelle et degré de connectivité de ces taches conditionnent la circulation des espèces, donc l'accès aux ressources.

³⁹ Selon les auteurs « Les groupes fonctionnels sont des groupes de taxons spécifiques qui répondent de la même façon à un facteur donné. Ils sont caractérisés par un ensemble d'attributs biologiques communs qui sont en corrélation avec leur comportement ».

Un autre courant de l'écologie proche de l'écologie du paysage est l'écologie spatiale, qui s'intéresse davantage à une compréhension des processus écologiques sans entrer d'emblée par les caractéristiques du paysage pour décrire un écosystème. L'écologie spatiale étudie la réponse des individus, des populations et des communautés à la variabilité de l'environnement. La prise en compte de l'hétérogénéité du milieu a permis de développer la théorie des métapopulations.

Théorie des métapopulations

Une métapopulation est définie comme un ensemble de populations locales reliées entre elles par cette dynamique d'extinctions et de recolonisations. La théorie des métapopulations prédit que l'extinction locale d'une population peut être compensée par la colonisation de l'espace par une autre population, à condition qu'un nombre suffisant de populations existe localement et que les individus puissent se disperser à nouveau vers l'habitat dans lequel il y a eu l'extinction (Hanski 1999). La capacité des individus d'une population de quitter une tache pour en rejoindre une autre de même type est le processus fondamental de maintien des métapopulations (Burel and Baudry 1999). En effet plus les tâches d'habitat favorable sont de taille réduite, plus les risques d'extinction des populations locales augmentent ; et plus elles sont espacées, plus la recolonisation des habitats vacants est difficile, surtout lorsque les espèces se déplacent peu ou que la structure du paysage affecte leur déplacement. Dans le cadre de la théorie des métapopulations, une matrice ou mosaïque paysagère est considérée comme étant de bonne qualité si elle permet que les taux de migration compensent les taux d'extinction locale (Perfecto *et al.* 2009). Dans les zones cultivées fortement perturbées, si les habitats semi-naturels sont peu étendus et distants, les espèces ayant la plus grande capacité à se disperser sur de longues distances ou qui ont des aires de répartition étendues auront plus de chances de survivre (Tscharrntke *et al.* 2005).

Du point de vue des méthodes d'analyse, les changements sont significatifs. La cartographie devient l'outil de base pour représenter le paysage : elle consiste à identifier sur un territoire donné les unités écologiques et spatiales ayant un certain degré d'homogénéité par rapport à un ou plusieurs attributs (communautés biotiques, nature du sol, topographie...) (Burel and Baudry 1999). Les différentes cartographies du paysage répondent à des questions et des hypothèses variées. Par ailleurs, il ne suffit plus d'étudier des surfaces-échantillon représentatives d'un milieu homogène, mais il faut prendre en compte des surfaces beaucoup plus étendues. Les infrastructures de recherche évoluent également. La création d'observatoires et de sites de recherche qualifiés de *Long term ecological research* (LTER) aux Etats-Unis date des années 1970. De tels sites permettent de mettre en place des recherches sur le long terme et à large échelle, de façon à comprendre les phénomènes écologiques pour une large gamme d'écosystèmes. La France s'est dotée de 11 Zones Ateliers depuis le début des années 2000. Ces sites, labellisés par le CNRS, couvrent généralement un territoire assez large. Ils sont destinés à mettre en réseau des équipes de recherche, de façon à promouvoir des recherches interdisciplinaires et se basant sur des approches variées (modélisation, analyse des données, enquêtes socio-techniques et

sociologiques, etc.). La labellisation de sites en zones ateliers permet de conserver une pérennité des sites d'observation et la continuité des programmes de recherche.

Selon Blandin (1997), l'écologie du paysage n'apporte pas de réel changement paradigmatique dans la mesure où elle ne fait que transposer l'approche écosystémique à une autre échelle spatiale :: elle répertorie et quantifie les flux en tentant de les expliquer par les structures spatiales des paysages (matrices, patches, corridors...). Toutefois il nous semble que le paysage introduit davantage qu'une nouvelle échelle d'analyse, puisqu'elle permet de qualifier des leviers de gestion influençant le fonctionnement des écosystèmes, et qu'elle donne ainsi des prises pour leur conception. La structure du paysage peut modifier les relations de prédation entre les différentes communautés, donc l'efficacité du contrôle biologique (Martin *et al.* 2013) ou encore de la prévention des maladies (Wood and Lafferty 2012). Améliorer la gestion des espaces naturels peut concerner divers types d'activités : limiter l'exploitation des ressources non renouvelables, lutter contre l'érosion de la biodiversité (à la fois génétique, spécifique et écosystémique), éviter la dégradation des milieux par la pollution, l'homogénéisation, la fragmentation, etc. L'aménagement de paysages favorables à la biodiversité nécessite d'identifier quelles peuvent être leurs bonnes propriétés. Il faut pour cela articuler des connaissances sur les relations entre structure spatiale des paysages et les processus écologiques d'une part, et d'autre part des connaissances sur les facteurs de la dynamique et de l'organisation des paysages, notamment d'origine anthropique.

La Figure 7 reprend les principales étapes de la généalogie des connaissances de l'écologie présentée dans les chapitres II et III de cette première partie de thèse.

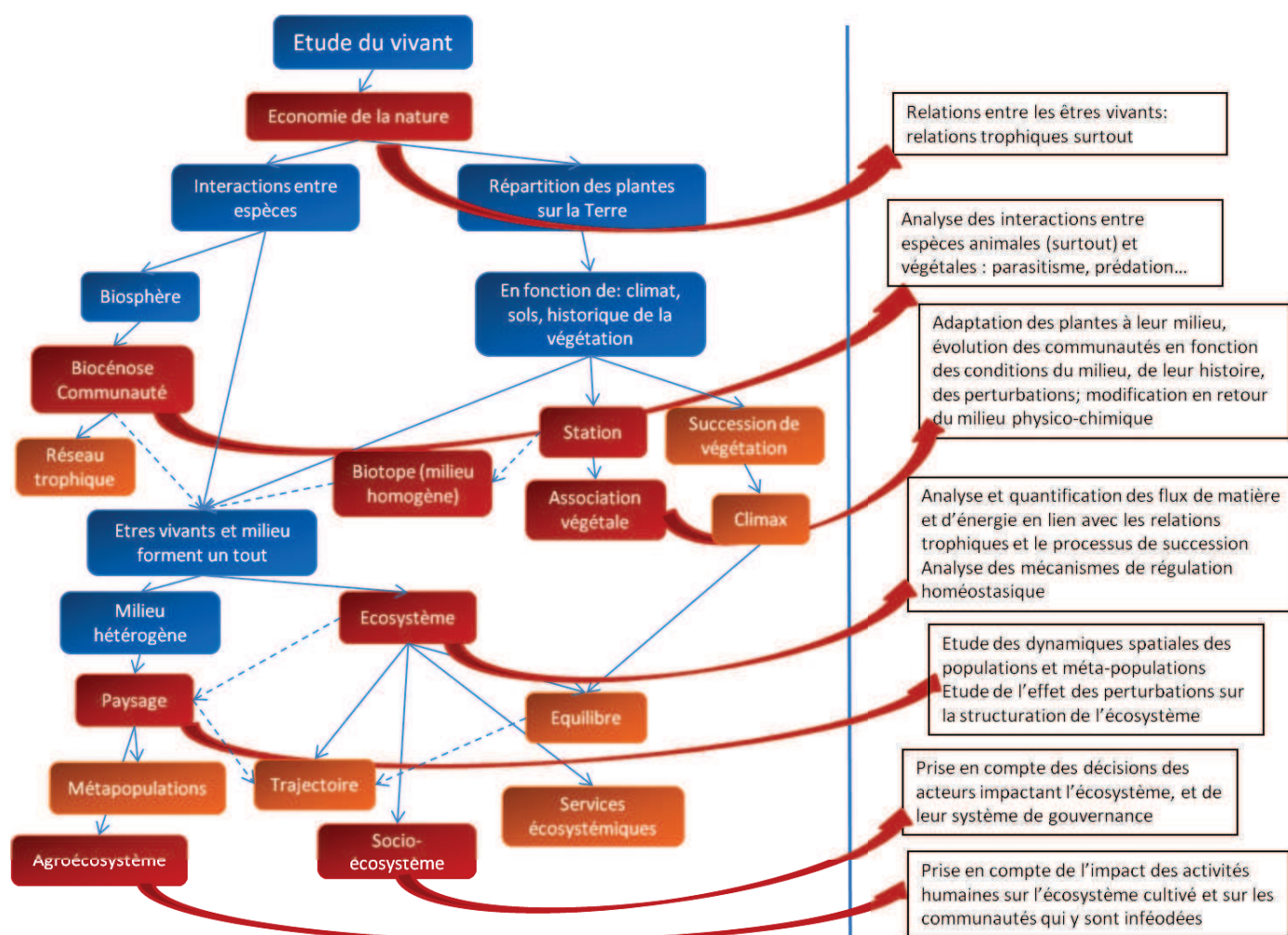


Figure 7 : Rappel des principales notions et modèles introduits en écologie, et progrès de connaissances associés

Cette figure s'inspire du formalisme de la théorie C-K, avec à gauche les nouvelles notions introduites permettant de renouveler les modèles de l'écologie et à droite les nouvelles connaissances qu'elles ont permis de produire. Les flèches bleues pleines rendent compte de la généalogie des notions et celles en pointillés traduisent la façon dont certaines sont combinées pour aboutir à la création de nouvelles.

3. L'agro-écosystème comme nouvel objet de conception ?

a. L'émergence du concept d'agro-écosystème

Selon Wezel *et al.* (2011), le terme agro-écologie a été introduit par l'agronome russe Bensin (1928) qui mentionne l'intérêt des méthodes de l'écologie pour la recherche sur les plantes cultivées. Il définit l'agro-écologie comme l'application de l'écologie à l'agriculture, un sens qui lui est encore attribué. Tischler (1950; 1965) élabore davantage le concept d'agro-écologie et présente des résultats de recherches mobilisant les principes de l'écologie sur l'adaptation et la protection des plantes ainsi que la biologie du sol. Il initie une approche écosystémique des milieux cultivés en étudiant les interactions entre différents compartiments (plantes, animaux, sols et climat), ainsi que l'impact de la gestion agricole sur ces compartiments. Les progrès techniques, liés notamment

à l'informatique, mais aussi conceptuels (voir travaux de l'IBP cités ci-avant) facilitent le développement d'une approche écosystémique dans l'agronomie. Le concept d'écosystème agricole devenu **agro-écosystème** est développé dans les années 1970 (Loucks 1977) et constitue un nouveau champ d'application pour l'écologie fonctionnelle. Toutefois l'étude des agro-écosystèmes doit mobiliser plusieurs disciplines : ces derniers sont plus complexes à étudier que les écosystèmes dits « naturels », car en plus des cycles d'énergie et de matière au sein du système sont à prendre en compte des processus anthropiques qui les influencent voire les contrôlent largement (*ibid.*). Les recherches doivent alors prendre en compte, en plus des processus écosystémiques, les préoccupations de rendement des agriculteurs et l'ensemble des facteurs (marché, régulations, facteurs socio-culturels, progrès techniques...) qui influencent leurs décisions. La modélisation de tels systèmes devient alors très complexe, car aux modèles purement écologiques doivent être associés des modèles agronomiques, socio-économiques, voire cognitifs.

L'agro-écologie, qui se développe à partir des années 1970, est alors définie comme un ensemble disciplinaire alimenté par le croisement des sciences agronomiques (agronomie, zootechnie), de l'écologie appliquée aux agro-écosystèmes et des sciences humaines et sociales (sociologie, économie, géographie) (Tomich *et al.* 2011). Son ambition est de développer un ensemble de pratiques agricoles reposant sur l'utilisation des processus écologiques et la valorisation de la biodiversité agricole (Gliessman 2007). L'agro-écologie vise à optimiser la productivité des agro-écosystèmes sur la base de concepts écologiques, mais aussi à renforcer leur capacité de résilience face aux incertitudes liées notamment au changement climatique (Voir les Mots de l'Agronomie⁴⁰). L'étude de la complexité des agro-écosystèmes s'oppose notamment à l'excessive simplification des systèmes cultivés liée à la modernisation agricole (Altieri 1989; Doré *et al.* 2011). A partir des années 1980, l'agro-écologie se déploie au niveau international en tant que discipline scientifique, mais devient aussi un mouvement social ainsi qu'un nouveau modèle de production agricole, visant spécifiquement à prendre en compte les conditions locales et les connaissances traditionnelles pour la production agricole (Altieri 1989; Wezel *et al.* 2011).

L'agro-écologie a beaucoup contribué à intégrer les connaissances de l'écologie dans les logiques agronomiques. Elle permet de faire évoluer les modèles et les représentations dans le secteur agricole, et développe des approches multidisciplinaires intégrant aussi les sciences sociales. Cependant ce qui nous intéresse dans la thèse est en quoi l'agro-écosystème renouvelle les

⁴⁰ <http://mots-agronomie.inra.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Agro%C3%A9cologie>

logiques de conception en agronomie, ce que nous abordons dans la partie suivante et qui motive nos questions de recherche.

b. L'agro-écosystème, une énigme pour la conception ?

Le fait de désigner l'agro-écosystème comme un nouvel objet de conception semble être prometteur pour continuer de faire converger les connaissances en écologie sur le fonctionnement des systèmes écologiques et la logique de l'agronomie.

Dans la littérature sont évoquées des méthodes de conception comme le mimétisme (Doré *et al.* 2011). van Noordwijk and Ong (1999) suggèrent par exemple qu'il faut imiter la structure, le fonctionnement et la diversité spécifique d'un écosystème naturel situé dans la même zone pédo-climatique. Toutefois Doré *et al.* (2011) soulignent qu'une telle méthode peut s'avérer limitée pour concevoir des agro-écosystèmes innovants, notamment car il faut prendre en compte les contraintes de production agricole, comme l'exportation de nutriments du sol par la récolte des cultures et car d'autres systèmes pourraient inspirer les concepteurs. Les auteurs suggèrent alors de considérer les agro-écosystèmes comme des systèmes cybernétiques caractérisés par de nombreuses boucles de régulation. Cependant, une telle représentation facilite-t-elle vraiment la conception ?

Considérer l'agro-écosystème comme objet de conception soulève plusieurs problèmes inédits. On ne le peut concevoir et prédire son évolution que partiellement, car en tant qu'écosystème il est doté de régulations propres, en partie inconnues. Un agro-écosystème n'a pas de concepteur donné ni légitime : la prise en compte de la gestion de processus écologiques requiert une coordination à plus large échelle que celle de la parcelle ou même de l'exploitation agricole. La conception soulève des questions nouvelles, à la fois au plan du raisonnement, des modèles conceptuels, mais aussi de l'organisation du système de conception.

La mise en évidence des propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance des systèmes écologiques

L'écologie met en évidence qu'en raison des interdépendances multiples entre les organismes vivants et leur milieu et des régulations complexes qui caractérisent les écosystèmes, on ne peut totalement en isoler une sous-partie pour l'optimiser. Le découplage et la modularisation ne sont pas adaptés à leur nature. On retrouve ce phénomène dans d'autres situations de conception, notamment artistiques. Le Masson *et al.* (2013 Bauhaus) ont par exemple étudié les travaux d'Itten sur la pédagogie au Bauhaus. Le professeur met en avant deux propriétés des œuvres artistiques, le non-déterminisme et la non-indépendance, pour susciter la créativité de ses étudiants (*ibid.*). Il commence par étendre les bases de connaissances des étudiants sur les couleurs, la texture, la

matière, etc. Or une fois qu'il a transmis ces connaissances et suscité l'intérêt d'en poursuivre l'acquisition, il ne propose pas aux étudiants de recette indiquant les « bonnes règles » de conception. Il met d'une part en avant la propriété de non-déterminisme de la création artistique pour lutter contre les clichés et inciter les étudiants à créer des contrastes, des ruptures par rapport à ce qui est communément considéré comme harmonieux. Par exemple, il indique que le fait de choisir de choisir un matériau ne doit pas conditionner le choix de la texture de l'œuvre (on peut choisir le bois comme matériau et réaliser une œuvre qui ne soit ni fibreuse ni chaude) (*ibid.*). D'autre part, il souligne la propriété de non-indépendance de la création artistique : en effet, le choix d'un attribut (texture, couleur, matière, etc.) va poser des contraintes qui se propageront à chaque étape de la conception d'une œuvre. Chaque choix successif va conditionner l'œuvre finale ; les différents choix réalisés au cours de la conception ne sont pas indépendants. Par conséquent, on ne peut les faire séparément avant d'assembler l'œuvre finale. Selon Itten, ces deux propriétés, le non-déterminisme et la non-indépendance, incitent à une créativité générique, c'est-à-dire une créativité qui porte simultanément sur de nombreuses propriétés des œuvres (*ibid.*).

L'écologie nous enseigne que les écosystèmes vérifient également ces propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance. (i) Le non-déterminisme, parce que des conditions physico-chimiques d'un biotope par exemple ne déterminent pas nécessairement les espèces qui vont le peupler. En effet, les espèces colonisent ce biotope en fonction de conditions en partie extérieures, puis elles interagissent entre elles et co-évoluent, notamment en fonction de perturbations aléatoires. En ce qui concerne l'action sur un écosystème, le non-déterminisme implique que lorsqu'on le modifie, les conséquences de cette modification peuvent être multiples. (ii) La non-indépendance, parce que les processus écologiques opèrent à des échelles multiples. Ainsi, on peut gérer une parcelle sans se préoccuper des parcelles voisines de manière à influencer la qualité de son sol, mais l'action sur la parcelle peut influencer la circulation de l'eau ou la dispersion d'espèces qui concernent des échelles plus larges. La non-indépendance implique que les contraintes se propagent, et que l'on ne peut savoir à l'avance quelle sera l'étendue des conséquences d'une action sur l'écosystème.

Comme le rappellent Le Masson *et al.* (2013), l'ingénierie systématique et les méthodes traditionnelles de conception réglée ont toujours cherché à éviter ces conditions de non-déterminisme et de non-indépendance. Elles ont essayé au contraire d'une part de modulariser la conception (*i.e.* diviser le système à concevoir en sous-systèmes, pour pouvoir penser la conception de chaque sous-système de façon indépendante), et d'autre part d'introduire du

déterminisme, c'est-à-dire d'identifier des solutions génériques à des problèmes donnés. Ainsi, les connaissances produites par l'écologie mettent en évidence les problèmes liés au découplage et à la modularisation de la conception en agronomie. L'écologie répond donc au moins en partie à la crise des savoirs à laquelle est confrontée l'agronomie.

Cette analyse met en lumière les nouveaux défis de conception de l'agronomie qui porte sur des objets non-indépendants et non-déterministes. Le secteur agricole avait tenté au cours des XIXe et XXe siècles de mettre en place un régime de conception réglée, qui s'appuie sur le découplage des objets et des processus de conception et la production de techniques de production standardisées. D'une part, cela confirme que cette logique de conception n'est pas adaptée aux systèmes écologiques, puisque chaque situation est singulière en fonction de son contexte biophysique et socio-économique. Comme le souligne Itten, le non-déterminisme et la non-indépendance impliquent le fait que la conception doit être créative et s'adapter aux différentes situations. Elle nécessite d'explorer un ensemble de voies nouvelles, adaptées aux conditions locales. D'autre part, cela met en évidence que la logique de décision individuelle n'est pas adaptée à une gestion des écosystèmes, car elle conduit forcément à un morcellement et une vision partielle du système à concevoir. Cette remise en cause concerne donc plus largement le système de relations à l'œuvre dans le secteur agricole. Il faut alors repenser les échelles de la conception et de gestion des écosystèmes cultivés : mais quel serait alors le bon « module » de conception ? Quel serait le bon compromis entre une échelle suffisamment large pour pouvoir prendre en compte un ensemble de processus écologiques tout en permettant d'identifier des spécificités de l'écosystème et les structures de gestion possibles ?

Questions de recherche

Comment faire en sorte que les raisonnements de conception développés par l'agronomie permettent de prendre davantage en compte les interactions écologiques ? Comment changer d'objet de conception pour prendre en compte ces nouveaux phénomènes et passer notamment à la conception de l'agro-écosystème ? Sur quoi doit alors porter la conception ? Et qui seront les concepteurs ? Comment notamment construire des espaces de conception partageables dans lesquels des acteurs aux intérêts différents pourraient s'exprimer ?

La thèse vise à traiter les **questions de recherche** suivantes :

Peut-on concevoir un agro-écosystème et qu'est-ce que le concevoir?

- **Sur quoi peut porter la conception?**
- **Quels sont les raisonnements à développer ?**

- **Quels critères d'évaluation développer?**

Quelles sont les conditions et les modalités de la conception d'un agro-écosystème?

- **Quels peuvent être les méthodes et outils de conception et de gestion adaptés ?**
- **Comment organiser l'action collective, quels modes de gouvernance sont appropriés ?**

Conclusion de la Partie 1

Dans cette première partie de la thèse, nous avons confronté la généalogie de la conception en agronomie à celle des connaissances en écologie pour apporter un éclairage particulier sur la façon dont s'est nouée la crise environnementale de l'agriculture. Nous avons mis en évidence que l'agro-écosystème était resté longtemps un point aveugle des deux disciplines. C'est le cas de l'agronomie en raison des dynamiques de resserrement et de confinement des objets de la conception, et de celles de découplage des objets de la conception entraînant un morcèlement des processus de conception. Ces dynamiques ont conduit à négliger certains processus écologiques, empêchant dans un premier temps le secteur agricole de changer de trajectoire pour remédier à ses impacts sur l'environnement. Nous qualifions cette période de crise des savoirs. Si l'écologie de son côté a pu éclairer l'agronomie sur les processus écologiques jusque récemment négligés, elle ne s'est intéressée que récemment et très progressivement aux milieux cultivés : l'agro-écosystème n'était pas réellement un objet d'étude pour l'écologie avant les années 1970-80. Ceci s'explique notamment par le paradigme, alors dominant en écologie, d'une évolution des écosystèmes vers un climax, un état d'équilibre optimal, mais aussi par la posture longtemps compréhensive de l'écologie, tournée vers la modélisation et non vers la conception.

Depuis maintenant près de 30 ans, chaque discipline a fait un pas vers l'autre, mais l'articulation entre les deux n'est pas facile à mettre en œuvre. L'« agro-écosystème » permet d'appliquer les théories de l'écologie et peut être abordé comme un nouvel objet de conception de l'agronomie. Mais alors, qu'est-ce que concevoir un agro-écosystème ? Sur quoi peut porter la conception ? Quels sont les leviers d'action ? Et qui peut prendre en charge cette conception ? Pour répondre à ces questions, nous nous appuyons dans la suite de la thèse sur une analyse approfondie des apports et limites de la littérature (Partie 2) et sur une étude de cas dans laquelle les acteurs sont confrontés à ces difficultés de conception (Partie 3), avant de proposer des éléments de réponse et de les discuter (Parties 4 et 5).

Partie 2 : Services écosystémiques et biens communs : intérêts et limites pour la conception des agro-écosystèmes

Introduction de la Partie 2

La question de la gestion des écosystèmes est instruite, notamment, dans deux domaines de recherche : l'un porte sur les services écosystémiques, et l'autre sur la gestion collective des biens communs étendue à la gestion des socio-écosystèmes. Dans cette partie, nous en soulignons les principaux apports et leur articulation possible, puis nous les interrogeons sous l'angle de leur capacité à traiter de la conception des agro-écosystèmes. Nous cherchons en particulier à mettre en évidence les hypothèses implicites faites sur les écosystèmes et le point aveugle de ces deux disciplines concernant les enjeux de conception relatifs aux services écosystémiques et aux biens communs.

La littérature sur les services écosystémiques propose une nouvelle représentation des liens entre les hommes et la « nature » : elle met en évidence le fonctionnement complexe des écosystèmes et s'intéresse à la façon de le prendre en compte dans les circuits économiques et institutionnels. Nous retraçons la genèse de la notion de services écosystémiques et analysons la façon dont elle est mobilisée aujourd'hui. Un certain nombre de confusions liées à cette notion et le fait qu'elle soit essentiellement mobilisée par l'analyse économique soulèvent des difficultés majeures dans une mise en œuvre opérationnelle.

La littérature qui nous intéresse sur les biens communs et les socio-écosystèmes concerne la durabilité de la gestion de ressources communes, notamment issues des écosystèmes. Elle explore une voie nouvelle par rapport aux solutions classiquement issues des recherches en économie (le marché et la régulation publique), celle de l'auto-organisation. Cette littérature propose des avancées intéressantes sur la gouvernance des ressources communes élargies aux socio-écosystèmes. Cependant, dans ces travaux, une hypothèse implicite mais d'une importance cruciale en limite la portée : les biens communs sont considérés comme des stocks à préserver.

Chapitre I. Les services écosystémiques : mise en évidence des spécificités des écosystèmes mais difficultés d'opérationnalisation

Ce premier chapitre présente une analyse de l'émergence de la littérature sur les services écosystémiques. Il met en avant les apports de la notion et l'agenda de recherche qu'elle a ouvert. Nous soulignerons cependant ses difficultés d'opérationnalisation en identifiant un certain nombre de limites, concernant à la fois sa conceptualisation et son application dans le cadre de logiques économiques.

1. Les services écosystémiques : une métaphore pour renouveler la représentation des écosystèmes

Suite à plusieurs ouvrages lanceurs d'alerte comme *Silent Spring* de Rachel Carson (1962) ou *The Limit to growth* du Club de Rome (Meadows *et al.* 1972), les scientifiques, notamment les écologues, s'investissent de plus en plus dans la sensibilisation du grand public et des décideurs politiques aux problèmes environnementaux. Divers concepts sont introduits, qui à la fois soutiennent cette volonté de sensibilisation et ouvrent de nouveaux agendas de recherche : c'est le cas des concepts de « biodiversité » et de « services écosystémiques ». Nous en présentons une rapide généalogie, leur définition ainsi que les relations entre ces deux concepts. Puis nous nous concentrons sur celui de services écosystémiques pour en exposer les apports, l'agenda de recherche qui s'est construit autour, et l'importance croissante de sa mise en politique.

a. Biodiversité et services écosystémiques, des notions introduites pour sensibiliser à la protection de l'environnement

Genèse des concepts de biodiversité et de services écosystémiques

L'expression « *biological diversity* » est employée pour la première fois par Thomas Lovejoy dans l'avant-propos de (Soule and Wilcox 1980) pour alerter contre la disparition massive des espèces :

« *Hundreds of thousands of species will perish, and this reduction of 10 to 20 percent of the earth's biota will occur in about half a human life span....This reduction of the biological diversity of the planet is the most basic issue of our time* ».

Le néologisme « *biodiversity* » qui en est issu est inventé par le biologiste Walter G. Rosen en 1985 lors de la préparation du premier forum américain sur la diversité biologique, puis il est rendu populaire par l'entomologiste américain E.O. Wilson qui en fait le titre du compte rendu de ce forum paru en 1988 (Wilson 1988).

Progressivement, la vision fixiste de la diversité biologique et centrée sur les espèces, prédominante à la fin du XIXe siècle, a été remplacée par une vision évolutive et fonctionnelle, intégrant la diversité au sein des espèces, notamment génétique, la diversité des associations d'espèces peuplant les écosystèmes et surtout l'importance des interactions entre toutes ces composantes (Chevassus-au-Louis *et al.* 2009). L'expression « biodiversité » ne tarde pas à être introduite dans les agendas politiques. En 1992, elle est au cœur des discussions lors de la Conférence de Rio, le « Sommet de la Terre », qui lance la Convention sur la diversité biologique (CDB), un texte ratifié en 2007 par 158 pays. Le maintien et la lutte contre l'érosion de la biodiversité devient alors un enjeu majeur de la préservation de l'environnement. Le concept ouvre la voie à de nombreux projets de recherche, notamment sur le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes. La perception de l'érosion accélérée de la biodiversité a motivé les efforts de construction d'indicateurs simples, compréhensibles par des décideurs politiques et, plus largement, par le grand public. L'objectif était de pouvoir suivre, à larges échelles (écosystèmes, paysages, écorégions), les variations temporelles de la biodiversité, notamment sous l'influence des activités humaines (Chevassus-au-Louis *et al.* 2009). Cependant la notion de biodiversité est difficile à caractériser, à évaluer, et plus généralement à mobiliser dans le cadre d'une amélioration de la gestion des écosystèmes.

En 1970, un autre concept est introduit, celui de « services écosystémiques », d'une part pour qualifier plus spécifiquement les processus intervenant dans le fonctionnement des écosystèmes, et d'autre part pour mieux qualifier l'impact des activités humaines sur ce fonctionnement. C'est le rapport du SCEP⁴¹ (SCEP and Matthews 1970), destiné à préparer la conférence de Stockholm de 1972, qui l'introduit alors qu'il vise à faire l'état des problèmes de dégradation de l'environnement à l'échelle de la planète. Il indique que ces services « déclineraient si les fonctions des écosystèmes déclinaient », et en donne la liste suivante: « contrôle des ravageurs, pollinisation par les insectes, pêcheries, régulation du climat, lutte contre l'érosion des sols, contrôle des inondations, formation des sols, recyclage de la matière, composition de l'atmosphère ».

Dans un premier temps, la notion de services écosystémiques est surtout utilisée à des fins de communication et de sensibilisation, et fait relativement peu l'objet de recherches en écologie. Mis à part quelques publications majeures dans les années 1980-90 (Costanza *et al.* 1997; Daily 1997), elle a surtout pris son essor avec le Millenium Ecosystem Assessment⁴² (Méral 2012). Ce

⁴¹ Study on Critical Environmental Problems : groupe d'une cinquantaine d'experts du MIT réunis par le Club de Rome

⁴² Le MEA est lancé à la demande de scientifiques et d'experts impliqués dans les négociations au sein de la Convention sur la diversité biologique et de la lutte contre la désertification. Il capitalise les avancées scientifiques en écologie et en économie sur les écosystèmes durant les années 1980 et 1990. L'idée est de parvenir à l'équivalent du travail effectué dans le domaine du changement climatique par l'Intergovernmental panel on climate change (IPCC ou GIEC en français).

rapport (MEA 2005) définit les services écosystémiques comme les « bénéfices que l'homme peut tirer des écosystèmes ». Il en propose une classification en quatre catégories : les services d'approvisionnement (nourriture, eau potable), les services de régulation (pollinisation par les insectes, purification de l'eau par les zones humides), les services de soutien (formation des sols) et les services culturels (activités récréatives, valeur sacrée).

Les liens entre biodiversité et services écosystémiques sont étroits : la biodiversité est le support de nombreux services : d'approvisionnement (ressources génétiques cultivées ou élevées), de régulation (insectes auxiliaires des cultures⁴³), de soutien (fertilité des sols) ; de plus elle constitue en tant que tel un service culturel (biodiversité patrimoniale, *e.g.* le panda). La notion de services écosystémiques soulève d'emblée la question de la limite de la substituabilité de la technologie et des activités humaines aux processus écologiques, qui dépendent de la biodiversité. La préservation des services écosystémiques doit contribuer à celle des écosystèmes donc de la biodiversité (Pearce and Moran 1994). La notion de services écosystémiques est mobilisée pour argumenter sur la valeur de la biodiversité ; elle notamment utilisée, nous le verrons, dans le cadre de l'évaluation économique de la biodiversité.

La notion de services écosystémiques présente de nombreux intérêts aux yeux des écologues et des défenseurs de l'environnement. Tout d'abord, elle permet de qualifier les impacts pour l'homme de crises environnementales majeures (érosion de la biodiversité, changement climatique, épuisement des sols...). Elle rend visibles les interdépendances nombreuses entre les hommes et les écosystèmes, et contribue à sensibiliser le grand public ainsi que les décideurs politiques et économiques à l'importance que peuvent avoir ces crises sur le bien-être de l'homme (Daily 1997; MEA 2005). Elle contribue à changer la perception des écosystèmes par nos sociétés : par exemple, alors que les zones humides étaient vues jusqu'au milieu du XXe siècle comme des zones à transformer car impropres à l'agriculture et véhiculant des maladies, elles sont reconnues aujourd'hui pour leur rôle dans la purification des eaux, l'atténuation des crues, le maintien de la biodiversité, etc. Elle met en évidence que les écosystèmes ont de la valeur pour notre société (Westman 1977; Costanza *et al.* 1997) et permet de rendre compte des conséquences et de l'irréversibilité des dégradations des écosystèmes liées aux activités humaines.

De plus, la notion de services écosystémiques incite à prendre conscience de la complexité des processus écologiques et de l'importance des mécanismes de régulation au sein des écosystèmes (Bennett *et al.* 2009). Elle souligne le fait qu'on ne peut intégralement contrôler, maîtriser ou

⁴³ Insectes qui sont utilisés comme agents de lutte biologique pour réduire les effectifs d'un organisme gênant (*e.g.* insectes ravageurs, plantes indésirables).

substituer les processus écologiques, ni même les isoler les uns des autres (Westman 1977). Ainsi, contrairement aux réponses envisagées depuis les années 1960-70 pour faire face à la dégradation des écosystèmes qui étaient plutôt ponctuelles (protection d'espèces remarquables ou interdiction de certains produits phytosanitaires), la notion de services écosystémiques propose de développer des approches plus systémiques tenant compte du fonctionnement des écosystèmes.

Mise à l'agenda politique de la notion de services écosystémiques

La publication du Millenium Ecosystem Assessment marque la mise à l'agenda politique de la notion de services écosystémiques (Méral 2012). En 2007, la FAO publie un rapport intitulé « La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture - Payer les agriculteurs pour les services environnementaux » (FAO 2007). Ce rapport étudie les modalités visant à réduire la dégradation des services écosystémiques par les activités agricoles et favoriser leur amélioration par de nouvelles pratiques agricoles. Il s'appuie sur les expériences de programmes de paiements pour services environnementaux déjà initiés en Amérique Latine. En 2008, le *World Resources Institute* a publié un rapport intitulé « Services d'écosystèmes - Guide à l'attention des décideurs » pour rendre opérationnelle cette notion dans la formulation de projets de développement. Par ailleurs, deux rapports portant sur l'évaluation économique des services écosystémiques en soutien à la décision publique ont été publiés suite au MEA : l'un au niveau français commandé par le Centre d'Analyse Stratégique, intitulé « Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes - Contribution à la décision publique » (Chevassus-au-Louis *et al.* 2009); l'autre au niveau international, *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB 2010) initié à la suite du G8+5 à Postdam en 2007. Les travaux du TEEB ont été présentés lors des Conférences des Parties sur la Convention pour la Diversité Biologique en 2009 et en 2010.

Au niveau Européen, le concept de services écosystémiques a été introduit dans le cadre de la renégociation de la politique agricole commune (PAC) à l'horizon 2013 qui réinterroge le lien entre production agricole et préservation de l'environnement. De plus, l'Union Européenne est engagée dans une démarche de cartographie des services écosystémiques, traduite en France par le projet Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques. Au niveau national, une réflexion sur la biodiversité a été engagée dans le cadre du Grenelle de l'Environnement en 2007 et avec la création de divers dispositifs, dont la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) en 2008 (Valette *et al.* 2012). Enfin, depuis les années 2000,

divers réseaux mobilisant la notion de services écosystémiques⁴⁴ se sont mobilisés pour convaincre les entreprises d'investir dans la préservation des écosystèmes.

La mobilisation des services écosystémiques pour l'évaluation économique de la nature

La notion de services écosystémiques a été introduite par des biologistes, mais elle est rapidement appropriée par les économistes qui s'intéressent à l'évaluation économique de la nature de manière à soutenir sa préservation, et ont fait des services écosystémiques un concept central de cette approche. Pour comprendre comment la notion a circulé entre ces deux disciplines, nous proposons à présent de retracer une généalogie de sa mobilisation dans les sciences économiques.

- *L'économie de l'environnement et l'introduction de la notion d'externalités*

La prise de conscience du coût environnemental de l'exploitation des ressources et de leur raréfaction due à nos modèles de croissance ont conduit à la création de **l'économie de l'environnement** dans les années 1970. Cette sous-discipline adopte les principes de l'économie néoclassique, notamment le principe d'optimum, c'est-à-dire la meilleure allocation des ressources rares compte tenu des préférences des agents économiques. Elle estime que les ressources environnementales continueront d'être dégradées tant qu'il n'y aura pas de marché, donc de prix permettant de révéler leur valeur. Elle propose alors de déterminer la « valeur économique de l'environnement », qui se décompose en valeurs d'usage et de non-usage (Pearce *et al.* 1990; Faucheux and O'Connor 2001). L'évaluation de la valeur économique de l'environnement est justifiée par divers objectifs: favoriser une meilleure prise de conscience de l'irréversibilité de la dégradation de la biodiversité et des ressources naturelles de la part des acteurs économiques, des décideurs et de la société dans son ensemble, influencer la prise de décision pour la planification de l'usage des sols et fixer des objectifs prioritaires de conservation, mais aussi concevoir de nouveaux instruments d'action publique : réviser les comptabilités économiques nationales, fixer des montants de taxes et amendes, etc. (OECD 2001).

L'économie de l'environnement a introduit la notion **d'externalités** pour décrire des situations où les décisions de consommation ou de production d'un agent affectent directement la satisfaction ou le profit d'autres agents, sans que le marché ne prenne ce phénomène en compte. Puis elle a développé diverses méthodes pour évaluer la valeur de ces externalités de façon à les « internaliser » dans les échanges économiques.

⁴⁴ A titre d'exemple, le World Business Council for Sustainable Development a publié en 2011 un guide à destination des entreprises intitulé « Entreprises et écosystèmes : Comprendre, Evaluer et Valoriser. Un guide pour améliorer la prise de décision en entreprise ».

- *L'émergence de l'écologie économique : endogénéiser le fonctionnement des écosystèmes dans les modèles économiques*

Jusqu'au milieu du XXe siècle, l'écologie et l'économie étudiaient chacune leur propre objet en excluant celui de l'autre, les écologues considérant que les hommes ne font pas partie des écosystèmes, et les économistes n'accordant que peu d'intérêt à la spécificité des ressources provenant de l'environnement⁴⁵. Pourtant, outre leur étymologie commune, l'écologie et l'économie partagent un certain nombre de concepts et d'outils. L'écologie étudie par exemple les organismes producteurs et consommateurs, utilise l'énergie comme « équivalent général » des échanges, ou encore évalue les flux d'entrée et sortie d'un système (Drouin 1991).

Avec la prise de conscience des impacts des activités humaines sur l'environnement, la nécessité de mieux comprendre les interactions entre systèmes socio-économiques et systèmes biologiques paraît cruciale à un certain nombre d'auteurs. D'une part, certains économistes, tels que Boulding (1966) et Georgescu-Roegen (1966), s'intéressent à la biologie pour renouveler les modèles économiques⁴⁶. Leurs travaux mobilisent des connaissances sur la thermodynamique, sur le fonctionnement des écosystèmes et sur la production de biomasse et d'énergie. D'autre part, des écologues, tels qu'Howard Odum dans son travail de modélisation des écosystèmes du point de vue de la circulation des flux d'énergie, se posent la question de l'intégration de l'homme dans ces modèles.

Daly⁴⁷ (1968) défend l'idée d'ajouter une nouvelle forme de capital aux facteurs de production pris en compte dans les processus économiques, qu'il nomme le « capital physique », puis qu'il développera sous le terme « capital naturel », largement repris par la suite dans la littérature en écologie économique :

« Physical capital is essentially matter that is capable of trapping energy and channeling it to human purposes. Hence, in a very real sense the entire physical environment is capital, since it is only through the agency of air, soil, and water that plant life is able to capture the solar energy upon which the whole hierarchy of life (and value) depends. Should not these elements receive the same care we bestow upon our other machines? And is not any theory of value that leaves them out rather like a theory of icebergs that fails to consider the submerged 90 per cent? »
(Daly (1968), p. 397)

Par la suite, Daly définit le capital naturel comme « le stock qui produit le flux de ressources naturelles » et cite en exemple « la population de poissons dans l'océan qui génère le flux de

⁴⁵ Herman Daly (1968) souligne ainsi : *“Ecologists abstract from the human economy and study only natural interdependences, while economists abstract from nature and consider only interdependences among commodities and man.”*

⁴⁶ Alfred Marshall écrivait en 1925 : *“In the later stages of economics, when we are approaching nearly to the conditions of life, biological analogies are to be preferred to mechanical”*

⁴⁷ Il fut le disciple de Georgescu-Roegen

pêche allant sur le marché » (Costanza and Daly 1992). Daly estime qu'il est possible de mettre en évidence les interdépendances entre systèmes humains et non-humains en identifiant les flux de matière entre les deux, que ceux-ci soient associés à des valeurs économiques ou non. Il suggère alors de mobiliser l'approche "*input-output*", initialement développée par Leontief, de façon à intégrer les échanges de marchandises dans l'économie de la nature (au sens linnéen du terme) qui les englobe⁴⁸ (Daly 1968).

S'inspirant des propositions de Daly, Costanza⁴⁹ modélise les flux d'énergie à travers les systèmes écologiques et économiques en développant une analyse *input-output*. Il estime alors que l'énergie doit être considérée comme un nouveau facteur de production, comme un « *input* primaire », et contribue au développement d'une théorie énergétique de la valeur (Costanza 2009). Les trajectoires d'Odum et de Costanza divergent alors sur la question de l'évaluation monétaire. Selon Odum, la valeur des biens doit rendre compte de la quantité d'énergie nécessaire à leur production plutôt que de l'utilité, qu'il considère comme subjective. Il rejette l'évaluation monétaire en affirmant qu'étant donné que les systèmes économiques ne sont que des composantes des systèmes biologiques, l'énergie devrait constituer un équivalent général et non la monnaie (Odum and Odum 2000). Costanza et Daly choisissent la voie de l'évaluation monétaire et fondent dans les années 1980 un nouveau courant de l'économie, l'économie écologique (*ecological economics*) (Voir Figure 8) qui se distingue de l'économie de l'environnement sur divers points.

⁴⁸ Il reconnaît que cette approche ne donnera qu'une vision incomplète des relations économiques et que les données nécessaires pour remplir les matrices « input-output » sont extrêmement nombreuses et difficiles à collecter. Toutefois il estime que cette approche peut être prometteuse à des échelles relativement localisées.

⁴⁹ Il a réalisé sa thèse avec Howard Odum en écologie systémique (matière dominante) et économie (matière secondaire)

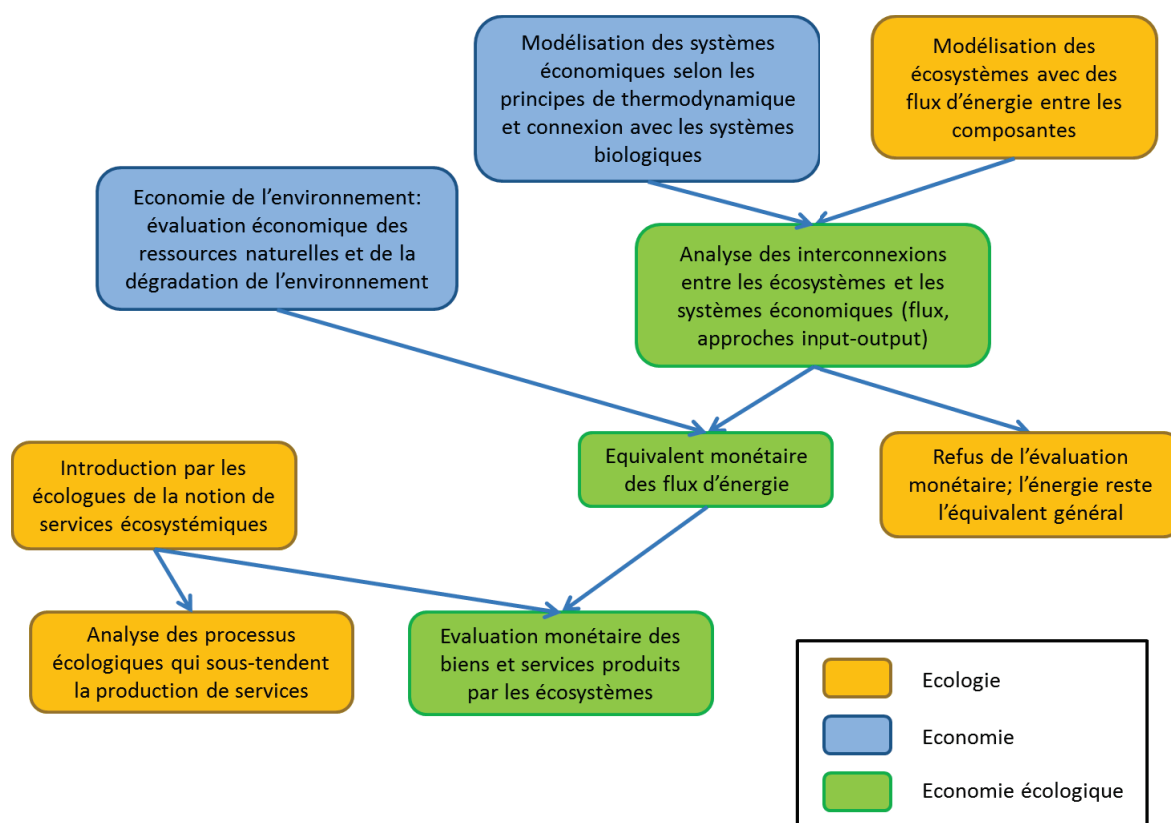


Figure 8 : Interactions entre écologie et économie conduisant à l'évaluation économique des services écosystémiques
 Cette figure reprend la double généalogie de la notion de services écosystémiques, avec l'émergence de l'économie écologique (en vert), à la croisée de travaux en écologie (en jaune) et en économie (en bleu).

- *Les divergences entre économie écologique et économie de l'environnement*

Une première divergence entre l'économie écologique et l'économie de l'environnement est que la première considère que le système économique est un sous-système de la biosphère, alors que la seconde considère plutôt la nature comme un input du système économique. La seconde divergence porte sur la possibilité de substituer des processus et des biens naturels par la technologie ou l'intervention humaine. En effet, selon le point de vue de l'économie de l'environnement, la durabilité (ou soutenabilité) dite « faible » peut être interprétée comme le non déclin de la consommation par individu, ce qui signifie que l'on estime que les effets positifs du progrès technique et/ou de l'accumulation du capital économique peuvent être supérieurs aux effets négatifs sur l'environnement. En d'autres termes, ce qui importe n'est pas la destruction des ressources et des écosystèmes naturels en tant que telle, mais la capacité de l'économie à y faire face. Or un principe fondamental de l'économie écologique est la complémentarité entre le capital naturel et le capital manufacturé, le second ne pouvant être substitué au premier. Ce principe de non-substituabilité conduit certains auteurs à introduire la notion de capital naturel

critique (Pearce *et al.* 1990), correspondant à l'ensemble des ressources environnementales qui, à une échelle donnée, remplit des fonctions environnementales indispensables mais non substituables par des formes de capital manufacturé, humain ou même naturel. On parle alors de « durabilité forte ». Dans cette perspective, le développement durable est caractérisé par la satisfaction du critère du changement non-négatif du stock de capital naturel au cours du temps avec le maintien des stocks de capital économique (Faucheux and O'Connor 2001). Enfin, une différence importante entre les deux disciplines par rapport à notre thèse est que la notion de services écosystémiques présente une avancée sensible par rapport à la notion d'externalité, car elle permet de qualifier la nature de ce qui est dégradé par les activités humaines.

b. L'agenda de recherche ouvert par la notion de services écosystémiques

La « TEEB » (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) propose un cadre commun de réflexion sur les écosystèmes en lien avec le bien-être social, dont est tirée le cadre d'analyse représenté dans la Figure 9.

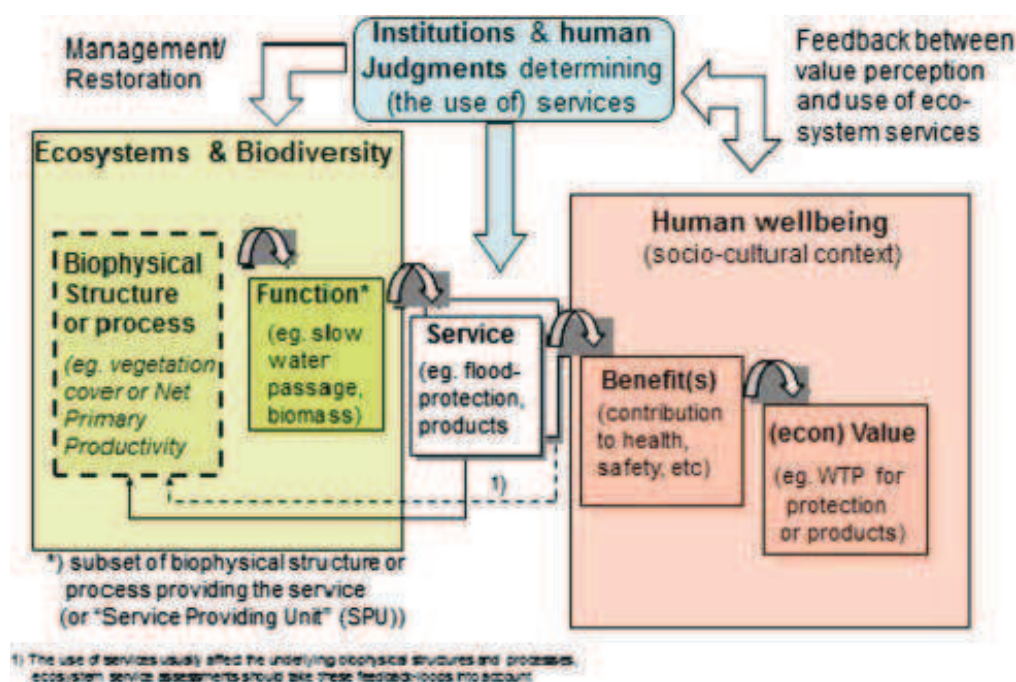


Figure 9 : Cadre d'analyse du concept de services écosystémiques (source : (De Groot *et al.* 2010))

Figure adaptée de (Haines-Young and Potschin, 2009). Selon ce cadre d'analyse, les services sont issus des fonctions écologiques, qui elles-mêmes reposent sur des processus écologiques, et donnent lieu à des bénéfices dont on cherche à évaluer la valeur économique.

Selon ce cadre d'analyse, les services sont issus des fonctions écologiques, qui elles-mêmes reposent sur des processus écologiques dépendant de la structure et de la composition des écosystèmes, et donnent lieu à des bénéfices dont on cherche à évaluer la valeur économique. Cette « cascade » de notions est abordée par ses deux extrémités, d'un côté par l'écologie qui étudie les liens entre processus écologiques et production de services, d'un autre côté par l'économie qui s'intéresse à l'évaluation économique de la valeur des services. Les flèches de rétroactions suggèrent que l'évaluation de la valeur des services permet d'améliorer la gestion des écosystèmes, via la modification des institutions et des perceptions humaines des services, donc des processus écologiques. Les services écosystémiques sont donc présentés comme une notion à l'interface entre l'écologie, l'économie et la gestion/gouvernance. Nous verrons cependant que chaque discipline aborde les services écosystémiques avec ses propres outils et approches, donc souvent de manière partielle.

Un renouvellement des recherches en écologie

L'agenda de recherche de l'écologie concernant les services écosystémiques est centré sur la compréhension des processus écologiques qui sous-tendent la production de services (Kremen and Ostfeld 2005; Bennett *et al.* 2009; Seppelt *et al.* 2011).

Un premier axe de travail de l'écologie concernant les services écosystémiques consiste à étudier les liens entre biodiversité et fourniture des services écosystémiques (Chevassus-au-Louis *et al.* 2009). C'est notamment l'objet de l'écologie fonctionnelle, qui mobilise le concept de « traits fonctionnels⁵⁰ » pour expliciter les liens entre composition des communautés de l'écosystème, fonctions écologiques et services écosystémiques. Cette discipline s'intéresse à la façon dont la biodiversité fonctionnelle, *i.e.* l'ensemble des fonctions des espèces présentes dans l'écosystème, influence les propriétés de ce dernier. Cela permet d'établir un lien entre la modification d'un milieu donc de la biodiversité fonctionnelle et la production de services écosystémiques (Díaz *et al.* 2007). Par ailleurs, Loreau (2001) et Tilman *et al.* (2005) font les postulats de corrélations positives entre la biodiversité et le niveau moyen de services écosystémiques, ainsi qu'entre la biodiversité et la stabilité de ces services. Toutefois ces relations peuvent avoir des configurations très différentes, comme le montre la Figure 10.

⁵⁰ Un trait fonctionnel est une caractéristique d'un organisme qui constitue une réponse à un ou plusieurs facteurs environnementaux ou qui affecte le fonctionnement de l'écosystème. L'étude des traits fonctionnels permet de retracer l'histoire écologique et évolutive des espèces ; elle sert aussi à prédire (i) la réponse d'une espèce à un changement dans son environnement ou (ii) l'effet de la présence de cette espèce sur cet environnement.

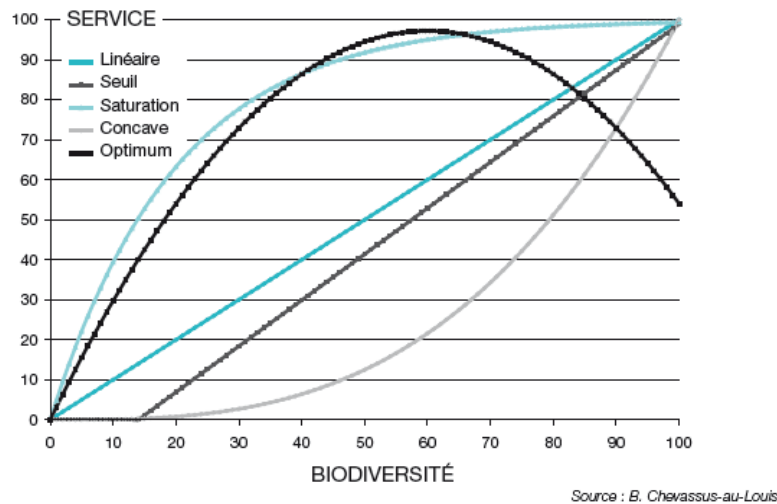


Figure 10 : Les différentes relations possibles entre variation de la biodiversité et variation des services écosystémiques
(source : Chevassus-au-Louis *et al.* 2009)

Chevassus *et al.* (2009) indiquent à propos de la Figure 10 : « Le cas le plus simple est celui d’une relation linéaire, dans lequel on suppose une proportionnalité entre les variations des deux facteurs (...). Le modèle « convexe » (modèle « saturation » de la figure) est basé sur l’idée de redondance fonctionnelle des espèces (plusieurs espèces jouant le même rôle écologique). Il suppose qu’une réduction notable de la biodiversité ne se traduirait, au moins dans un premier temps, que par des diminutions relativement limitées des services écologiques (...). Le modèle « concave » met au contraire en avant le rôle majeur de certaines espèces-clés dont la disparition peut avoir des conséquences majeures. Il prédit que des variations, même faibles, de la biodiversité pourront se traduire par une forte réduction des services écosystémiques (...). Enfin, on peut avoir des modèles « à seuil », linéaires ou non, dans lesquels le service varie brutalement, voire s’annule en dessous d’une certaine valeur non nulle de la biodiversité ».

Un second axe de travail concerne l’étude des interactions entre services écosystémiques (Rodriguez *et al.* 2006; Bennett *et al.* 2009), pour pouvoir comprendre notamment comment gérer simultanément de multiples services écosystémiques à l’échelle des paysages. La gestion combinée de services suppose de disposer de méthodes d’évaluation de ces derniers en fonction des paramètres biophysiques et socio-économiques. Elle suppose aussi d’analyser comment ces services peuvent être regroupés, et de définir les critères nécessaires à la prise de décision vis-à-vis de compromis et de synergies. Dans cette perspective, certains écologues proposent de travailler sur des « faisceaux » ou « bouquets » de services écosystémiques, c’est-à-dire des ensembles de services qui apparaissent simultanément dans l’espace et dans le temps, et ce de façon répétée (Raudsepp-Hearne *et al.* 2010). La composition de ces faisceaux montre que les services

écosystémiques ne sont pas distribués aléatoirement mais apparaissent simultanément, car ils sont liés par des interactions écologiques.

Le fait de considérer simultanément plusieurs services permet d'étudier les *trade-offs* (*i.e.* antagonisme) et les synergies entre services : un *trade-off* signifie formellement une relation négative (lorsque A augmente, B diminue) ; une conséquence en est que la fourniture d'un service est altérée par la production d'un autre. Le *trade-off* peut être soit temporel, à plus ou moins long terme, soit spatial, à une distance plus ou moins grande de là où se produit l'action sur l'écosystème (Rodriguez *et al.* 2006). Une synergie entre services signifie formellement une relation positive (lorsque A augmente, B augmente ; et lorsque A diminue, B diminue). Selon Bennett *et al.* (2009), trois configurations peuvent expliquer ces interactions : i) la fourniture de A influence la fourniture de B ; (ii) A et B sont influencés par le même déterminant ; iii) on a une combinaison des deux hypothèses. Gérer les interactions entre services peut aider à éviter la trop forte dégradation de certains services lorsque la gestion en cible d'autres ; cela peut aussi conduire à créer des paysages multifonctionnels (*i.e.* produisant une variété de services : par exemple un espace agricole offrant des activités récréatives et favorisant la biodiversité). Cela peut être intéressant notamment en termes de conservation, puisqu'au lieu d'exclure les activités humaines d'un espace pour en préserver certaines espèces, la gestion des interactions entre services pourrait aider à concilier les deux (Kareiva *et al.* 2007).

Toutefois, Seppelt *et al.* (2011) soulignent la tendance de certains travaux à établir des liens directs et linéaires entre des types de couverts végétaux ou encore la structure des écosystèmes et la production de services écosystémiques, de façon à pouvoir évaluer la quantité de services écosystémiques produits à l'échelle de la planète. De même, Bennett *et al.* (2009) indiquent :

“Several recent papers explore the spatial patterns of provision of multiple services across landscapes, focusing on spatial concordance among services as evidence of winwin opportunities for conservation of multiple ecosystem services and biodiversity, a traditional conservation target (e.g. Chan et al. 2006; Egoh et al. 2008; Naidoo et al. 2008; Nelson et al. 2009) (...); however, they have typically not assessed the mechanisms behind the relationships between services.” (Bennett *et al.* (2009), p. 2)

Un troisième axe de travail en écologie concerne les liens entre production de services écosystémiques et résilience des écosystèmes. La dynamique des écosystèmes est au cœur des préoccupations lorsqu'il s'agit de gérer les écosystèmes, et les écologues s'attachent à comprendre les effets de seuil, de non-linéarité et d'irréversibilité dans les écosystèmes. Selon Bennett *et al.* (2009), la compréhension des interactions entre services écosystémiques peut éclairer les

propriétés de résilience des écosystèmes. Les auteurs soulignent que les interactions impliquent très fréquemment des services de régulation et que ces derniers jouent généralement un rôle important dans les mécanismes de résilience des écosystèmes. D'après Foley (2005), piloter la production d'une diversité de services écosystémiques peut contribuer à maintenir la durabilité du fonctionnement d'un écosystème. Toutefois les liens entre diversité de services à maintenir et résilience des écosystèmes restent à expliciter.

Comme le soulignent Seppelt *et al.* (2011), différentes méthodologies sont utilisées en écologie :

“The measurement, modelling and monitoring of ecosystem functions are the foundation for ecosystem service assessments and are thus the basis for the sustainable use of biodiversity, ecosystems and natural resources in general (Carpenter et al. 2009) (...). A variety of methodological approaches are available to describe these non-monotonous, non-linear and time-variant relationships that all require data, maps, monitoring (Lautenbach et al. 2010), fieldwork or experiments (e.g. Greenleaf & Kremen 2006; Sandhu et al. 2008) and/or models (Boumans et al. 2002; Schröter et al. 2005) ». (Seppelt *et al.* (2011), p. 633)

Toutefois divers auteurs questionnent la capacité prédictive de l'écologie (Norgaard 2010), d'une part car il est très difficile de mettre en place des expérimentations permettant d'analyser rigoureusement les relations entre biodiversité et services écosystémiques (Le Roux *et al.* 2008), et d'autre part car la plupart des études ne prennent en compte qu'un seul service ou un nombre limité de services, donc ne peuvent pas réellement analyser les interactions entre services (Seppelt *et al.* 2011). De plus, les connaissances produites sont très dépendantes de leur contexte. Ainsi, si les progrès des connaissances en écologie sur les services écosystémiques sont significatifs, la mobilisation de cette notion dans les décisions de gestion reste difficile.

L'intérêt de la notion de services écosystémiques pour repenser les régulations entre activité agricole et environnement

Les services écosystémiques offrent également un nouveau cadre pour penser les relations entre les pratiques agricoles et le fonctionnement des écosystèmes. Le Roux *et al.* (2008) reprennent les travaux de Zhang *et al.* (2007), qui appliquent la typologie des services écosystémiques du MEA aux agro-écosystèmes : ils proposent de distinguer trois catégories de services : « 1) Les services intrants, qui contribuent à la fourniture de ressources nécessaires à la production agricole et au maintien des supports physico-chimiques, et qui assurent la régulation des interactions biotiques (...), comme le maintien de la fertilité des sols ou la pollinisation ; 2) les services de production contribuant au revenu agricole (...); 3) les services produits hors revenu agricole direct, qui incluent le contrôle de la qualité des eaux, la séquestration du carbone ou la valeur esthétique des paysages notamment. » Ainsi certains services écosystémiques affectent directement les résultats

de la production agricole, tels que les insectes auxiliaires des cultures, d'autres concernent sa durabilité, comme la limitation de l'érosion des sols ou conservation des ressources génétiques ; d'autres n'ont pas de liens directs identifiés, par exemple la biodiversité patrimoniale. Par ailleurs, l'agriculture contribue à la production de services d'approvisionnement (nourriture, fibres, biomasse), mais de manière exacerbée par rapport à d'autres services (Foley *et al.* 2005). Les agro-écosystèmes sont donc un domaine d'application du concept de services écosystémiques, où les relations entre services, antagonismes ou synergies, se posent avec une acuité particulière et de manière complexe.

La notion de services écosystémiques est intéressante dans le sens où elle peut aider les gestionnaires des agro-écosystèmes, et plus particulièrement les agriculteurs, à réviser l'identité de leurs objets de gestion : elle invite à reconnaître l'importance de processus écologiques aujourd'hui non pris en compte dans la conception de systèmes de production agricole. Par rapport aux approches basées sur la substitution des technologies artificielles aux processus écologiques, la notion de services écosystémiques ouvre de nouvelles perspectives reposant sur l'ingénierie écologique⁵¹. La notion de services écosystémiques vise également à élargir les critères de performance de ces systèmes : alors qu'en agronomie le principal critère de performance est celui du rendement à l'hectare, d'autres critères peuvent être mis en avant comme la qualité de l'eau ou le maintien de la biodiversité patrimoniale. Enfin, la réflexion sur la contribution de l'agriculture à la fourniture de services écosystémiques invite également à réfléchir à de nouveaux dispositifs permettant leur identification, leur gestion (individuelle ou collective) et leur valorisation économique, voire à repenser profondément l'identité des systèmes de production mais aussi des filières agricoles.

L'évaluation économique des services écosystémiques

Si l'économie écologique et l'économie de l'environnement se rejoignent sur l'évaluation monétaire des ressources naturelles, la volonté affichée par la première de prendre en compte la complexité et la spécificité du fonctionnement des écosystèmes se heurte à des difficultés nouvelles pour l'évaluation monétaire. La notion de services écosystémiques, introduite pour mieux décrire les interactions entre systèmes écologiques et systèmes socio-économiques, est au cœur de ces difficultés liées à l'évaluation économique.

La Figure 11 présente un ensemble de méthodes d'évaluation économique. Nous n'abordons pas dans le cadre de la thèse leur comparaison ou leur analyse. Nous soulignons simplement la

⁵¹ Elle peut être définie comme étant l'application des principes de l'écologie à la gestion de l'environnement. La réhabilitation des sols pollués par les métaux lourds, via le semis de plantes accumulatrices de ces polluants, l'épuration des eaux par les microorganismes sont des exemples d'ingénierie écologique.

diversité des cadres théoriques et des méthodes mobilisés pour évaluer des formes de valeur qui elles-mêmes sont de nature variée.

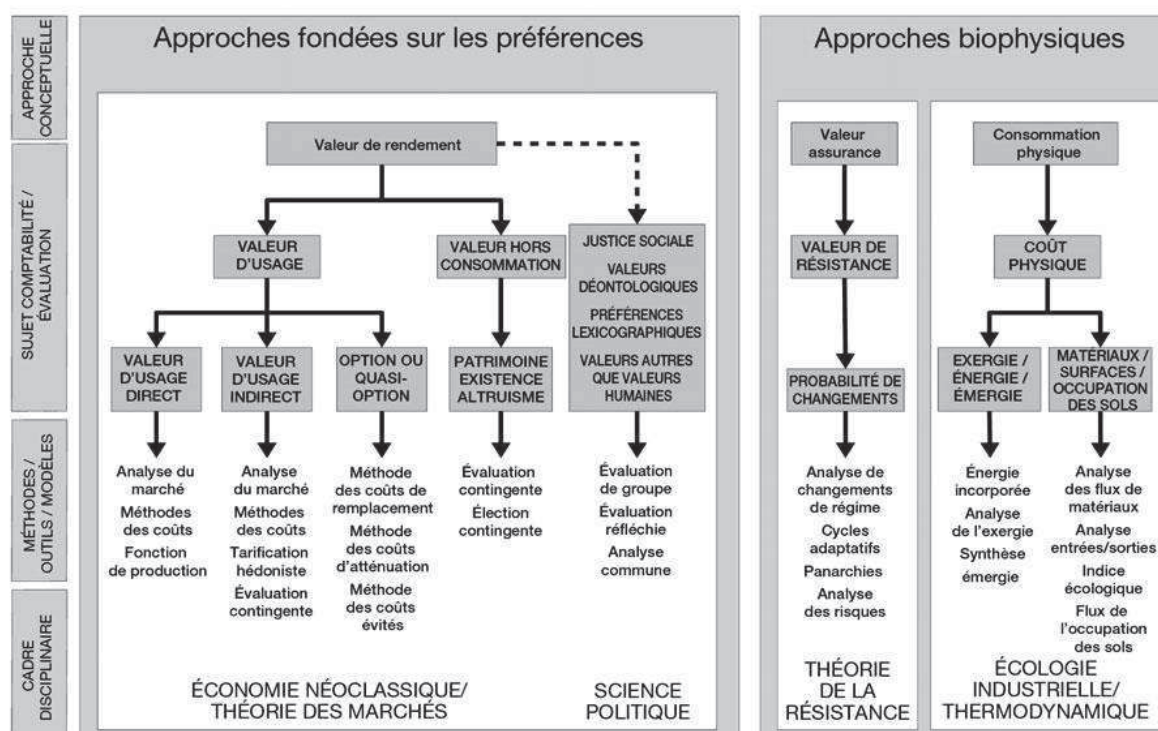


Figure 11 : Diversité des méthodes d'évaluation de la valeur économique de l'environnement
(Source : TEEB (2010) p. 12)

La Figure 11 distingue à gauche des méthodes d'évaluation de la valeur (en termes monétaires ou non) et à droite des approches biophysiques (mobilisant notamment l'énergie comme unité) pour lesquelles la TEEB précise : « Certains aspects du fonctionnement de écosystèmes tels que la résistance écologique ou la proximité des points de bascule sont difficiles à traduire sous forme d'évaluations. Dans de tels cas, ces renseignements devraient plutôt être présentés aux côtés des calculs de l'évaluation » (TEEB (2010), p. 15).

Différentes méthodes d'évaluation (voir aussi la revue de littérature de (Christie *et al.* 2012) seront employées selon :

- si les services écosystémiques ont un prix explicite ou sont commercialisés sur un marché ouvert. Il s'agit des services d'approvisionnement auxquels on attribue des valeurs d'usage direct.
- si on peut leur attribuer des valeurs d'usage hors consommation pouvant inclure l'importance culturelle d'un paysage ou d'une espèce ; ces avantages sont rarement estimés en termes monétaires.

Le rapport de la TEEB (2010) précise que les services de régulation (*e.g.* purification de l'eau) ne se sont vu attribuer une valeur économique que récemment, à laquelle on a donné le nom de valeur d'usage indirect. Ces valeurs demeurent aujourd'hui encore largement invisibles dans les systèmes de comptabilité de la société.

La mobilisation des services écosystémiques dans les instruments de politiques publiques

Seppelt *et al.* (2011) soulignent que la façon de mobiliser les évaluations des services écosystémiques sont variées :

« The topic of how to implement the ecosystem service assessments has been taken up by several previous publications. Boyd & Banzhaf (2007) and Fisher, Turner & Morling (2009) focus on the quantification of ecosystem services and their value to stakeholders and suggest various classification schemes. Cowling et al. (2008) recommend mainstreaming the concept in the assessment, planning and management phases of policy-making. Turner & Daily (2008) propose that ecosystem service research should address the various stages in decision-making, from problem identification to policy evaluation and capacity building ». (Seppelt *et al.* (2011), p. 631)

Ces auteurs soulignent que la notion de services écosystémiques est notamment mobilisée pour le développement de nouveaux instruments et politiques publiques intégrant des perspectives sociales, économiques et écologiques. Daily and Matson (2008) proposent trois pistes pour opérationnaliser la notion de services écosystémiques : (i) mettre en place une science de la production des services écosystémiques, y compris leur cartographie, (ii) créer des institutions financières, politiques et de gouvernance des services, et (iii) mettre en œuvre ces politiques dans des contextes précis. Par ailleurs, cette notion, aujourd'hui largement mobilisée par les instances de décision, soulève de nouvelles questions juridiques, sur la question de la responsabilité environnementale et l'atteinte aux services écosystémiques, mais aussi sur les modes d'élaboration du droit (acteurs, échelles, outils...) (Doussan 2009).

Cependant, malgré l'engouement à la fois scientifique et politique pour la notion de services écosystémiques, et malgré les intérêts indéniables qu'elle représente pour changer la perception de l'homme sur les écosystèmes, cette notion présente un certain nombre de limites, notamment concernant son opérationnalisation (Turner and Daily 2008; Seppelt *et al.* 2011). Nous proposons maintenant d'en étudier précisément les raisons.

2. Les limites et difficultés de l'opérationnalisation des services écosystémiques

a. Les confusions liées à la notion de services écosystémiques

Services écosystémiques ou services environnementaux ?

Diverses terminologies coexistent dans la littérature avec celles de services écosystémiques, notamment celles de services écologiques, services de la nature ou services environnementaux. Elles ne renvoient pas forcément aux mêmes phénomènes, notamment car elles ont été introduites par des disciplines de recherche différentes.

Deux courants de l'économie traitent des « services environnementaux » : l'économie de l'environnement et l'économie des services. Ce concept est sensiblement différent de celui de « services écosystémiques », notamment pour ce qui concerne le rôle assigné aux acteurs dans la fourniture des services. En nous appuyant sur les travaux d'Aznar (2002) nous comparons dans le Tableau 2 les définitions et les modèles associés à ces différents types de services dans les trois courants de l'économie.




Qualification du service (discipline associée)	Définition	Illustration
Services écosystémiques (<i>Ecological economics, Ecologie</i>)	Bénéfices que les hommes peuvent tirer des écosystèmes	
Services environnementaux (<i>Economie de l'environnement</i>)	Externalités positives de production procurant aux individus un bien-être plus élevé (et/ou procurant aux firmes un profit supérieur)	
Services environnementaux (<i>Economie des services</i>)	Activités économiques relevant du secteur tertiaire et visant la préservation de l'environnement	

Tableau 2 : Différentes définitions et représentations possibles de la notion de services écosystémiques/ environnementaux (inspiré d'Aznar (2002))

Le schéma du haut représente un écosystème dont les processus écologiques (flèches vertes) sous-tendent la production de services écosystémiques ; celui du milieu représente un acteur qui agit sur un écosystème pour en tirer un revenu, cette activité générant une externalité : le service environnemental ; le schéma du bas représente une activité de gestion de l'écosystème considérée comme un service environnemental.

Selon les sous-disciplines de l'économie, et selon s'il s'agit de service écosystémique ou de service environnemental, le rôle des acteurs et du fonctionnement de l'écosystème dans la production d'un service est très variable :

- Selon l'acception des *ecological economists*, les services sont produits par les écosystèmes. Ils sont définis comme des flux issus d'un stock de capital naturel, et ne semblent pas nécessiter d'action de gestion de la part des individus ; ces derniers bénéficient des services écosystémiques dans tous les cas. La gestion semble donc absente de cette représentation, ou simplement limitée à la préservation du fonctionnement de l'écosystème tel quel (en d'autres termes au maintien du stock).
- Dans la définition que donne l'économie de l'environnement, le service environnemental est une résultante d'une action de gestion lucrative de l'écosystème (par exemple la production agricole). Il est considéré comme une externalité pouvant bénéficier à d'autres acteurs mais qui n'est pas prise en compte par le marché. Il est généralement non intentionnel. Par exemple, le fait que les éleveurs fassent pâturer les moutons dans les paysages secs des Pyrénées orientales leur permet de produire de la viande qu'ils vont vendre (activité économique), mais cela permet aussi de limiter les risques d'incendies (service environnemental équivalent à une externalité). Les économistes cherchent à internaliser ces services environnementaux dans les circuits économiques, afin d'inciter les agriculteurs à les produire ou à limiter leur dégradation. Ainsi, Madelin (1994) (cité par Aznar (2002), p. 34) affirme que « les services environnementaux de l'agriculture doivent être rémunérés, directement par les utilisateurs lorsque c'est possible ou par des aides publiques, associées à des contreparties ». Cette notion est donc essentiellement mobilisée pour concevoir des instruments d'action publique.
- Dans le cadre de l'économie des services, le service environnemental est lié à une action de gestion intentionnelle (Aznar 2002). C'est une part de l'activité économique humaine dont l'objectif est de prévenir la dégradation de l'environnement ou de contribuer à une compensation des dommages (Aznar *et al.* 2002). Il s'agit d'une catégorie de services⁵² s'ajoutant aux catégories économiques classiques (santé, éducation...), sur laquelle se positionnent divers types d'opérateurs économiques qui ne sont pas forcément les agriculteurs ni les sylviculteurs. Aznar et Perrier-Cornet (2003) définissent le service environnemental comme « une intervention sur un bien de nature⁵³ (non marchand), en

⁵² L'OMC distingue 7 classes de services environnementaux (OMC, 2000) : l'eau potable et la gestion des eaux usées, la gestion des déchets, la protection de l'air et du climat, la remise en état des sols et de l'eau, la lutte contre le bruit et les vibrations, la protection de la diversité biologique et des paysages, autres).

⁵³ Selon les auteurs, un bien de nature appartient au patrimoine naturel

vue de permettre l'usage environnemental de ce dernier ». Les auteurs associent au service environnemental une action de gestion intentionnelle, désignant des acteurs producteurs et bénéficiaires du service ainsi que des règles de production, d'échange et d'accès au service. Mais le bien de nature ne semble être qu'un élément de l'écosystème.

Aucune de ces définitions ne nous semble totalement satisfaisante dans le cadre d'une réflexion sur la conception d'agro-écosystèmes durables. La première définition masque en effet l'effort de gestion nécessaire à la production des services écosystémiques, qui semble essentiellement dépendre des processus écologiques ; les deux autres ne mettent pas l'accent sur le fonctionnement de l'écosystème, donc masquent la difficulté de le prendre en compte dans une perspective de conception et de gestion.

Fonctions écologiques, services écosystémiques et bénéfices : une distinction problématique

Le cadre d'analyse des services écosystémiques proposé par la TEEB (voir Figure 9) présente ces services comme issus des fonctions écologiques et donnant lieu à des bénéfices dont on cherche à évaluer la valeur économique. Or la distinction entre fonctions écologiques, services et bénéfices n'est pas évidente à opérer, en témoigne la pluralité des définitions proposées dans la littérature (voir Tableau 3).

Référence	Définition des services écosystémiques
Daily, 1997 (<i>écologie</i>)	<i>The conditions and processes through which natural ecosystems, and the species that make them up, sustain and fulfill human life</i>
Costanza <i>et al.</i> , 1997 (<i>économie écologique</i>)	<i>Ecosystem goods and services represent the benefits human populations derive, directly or indirectly, from ecosystem functions</i>
MEA, 2005 (<i>pluridisciplinaire</i>)	<i>The benefits people obtain from ecosystems</i>
Fisher <i>et al.</i> , 2009 (<i>économie de l'environnement</i>)	<i>The aspects of ecosystems utilized (actively or passively) to produce human well-being</i>

Tableau 3 : La coexistence d'une multiplicité de définitions des services écosystémiques dans la littérature

Pour certains auteurs, un service écosystémique est un processus écologique (Daily), pour d'autres un bénéfice (Costanza, MEA), donc plutôt le produit d'un processus. Certains scientifiques mettent l'accent sur le fait que les services écosystémiques, tels qu'ils ont été définis dans le MEA, confondent ce qui relève de la structure des écosystèmes, de leurs fonctions et de l'utilisation de ces fonctions par l'homme. Par exemple, Lamarque *et al.* (2011), dans un cas d'étude des services fournis par des prairies semi-naturelles, montrent que les différentes

acceptions de la notion de service écosystémique peuvent amener à des évaluations très contrastées, que ce soit en termes de qualité, quantité ou localisation des services. Selon ces auteurs, un compromis doit être trouvé entre une définition élargie utile pour la communication et les politiques à grande échelle, et une définition plus précise et mieux adaptée aux actions de gestion des écosystèmes.

Cette difficulté de distinction entre fonctions, services et bénéfices est à relier au débat entre économistes sur la prise en compte des services intermédiaires et/ou des services finaux dans l'évaluation économique. Fisher *et al.* (2009) critiquent par exemple le positionnement d'économistes tels que Boyd and Banzhaf (2007) qui considèrent les services comme des “*directly consumable end points*”. Ils insistent sur le fait que les services écosystémiques sont des phénomènes écologiques qui ne sont pas forcément directement utilisés par l'homme, mais qui peuvent lui être utiles indirectement. Boyd and Banzhaf (2007), quant à eux, dans un souci d'évaluation économique des services, ne ciblent que des services dits « finaux », c'est-à-dire les produits ou les caractéristiques résultant des processus écologiques (et non pas les processus eux-mêmes, qui pour eux sont des fonctions écologiques). Ils rejoignent en cela les économistes qui suggèrent de distinguer le fonctionnement interne des systèmes du capital naturel (les fonctions de régulation), des fonctions fournies par ces systèmes qui, elles, peuvent être évaluées du point de vue de l'activité économique et du bien-être humain (Faucheux and O'Connor 2001).

Toutefois cette distinction entre fonctions de régulation et fonctions fournies par les écosystèmes à l'homme ne nous paraît pas satisfaisante, étant donné que précisément toutes les fonctions des écosystèmes sont interdépendantes les unes des autres. De même, le fait de désigner un service et de l'isoler pour en évaluer la valeur est purement conceptuel, puisque les processus écologiques qui le sous-tendent sont en interaction avec d'autres. Cet aspect est d'ailleurs problématique pour les économistes, qui, pour réaliser l'évaluation économique des services doivent en établir des catégories (Fisher *et al.* 2009). Westman (1977) soulignait déjà que le fait de devoir isoler un service écosystémique pour en évaluer la valeur induisait forcément les économistes à la sous-estimer. Norgaard et Bode soulignent cette difficulté ainsi:

“there was concern that the specific services that were valued could not be separated from each other and valued individually. Such an atomistic approach defies our understanding of ecosystems as tightly interlocked systems, coevolving systems...” (Norgaard and Bode (1998), p. 37)

La multiplicité de classifications des services écosystémiques

References	Pearce & Turner (1990)	De Groot (1992)	Daily (1999)	Ekins <i>et al.</i> (2003)	MEA (2005)
Categories	Source	Production	Production of goods	Source	Provisioning
	Sink	Regulation	Regeneration process	Sink	Regulation
			Stabilizing processes		
	Services functions	Habitat		Life support	Supporting
		Information	Life-fulfilling functions	Human health & welfare	Cultural
			Preservation of options		

Tableau 4 : Comparaison de typologies de services écosystémiques tirées de la littérature (source Allenvi, non publié)

En tête de colonne figurent les références bibliographiques des classifications présentées, et sous ces références sont indiqués en colonne les noms de chaque catégorie.

Diverses classifications des fonctions écologiques et des services écosystémiques ont été proposées dans la littérature. La comparaison entre certaines d'entre elles (dont celle du MEA évoquée précédemment), figurant dans le Tableau 4, met en évidence que quatre grands types de catégories reviennent systématiquement, avec des appellations parfois différentes :

- **Source/production/approvisionnement** : Cette catégorie concerne tout ce que les écosystèmes ou les systèmes naturels nous fournissent comme : alimentation, matières premières (biomasse, énergie, fibres naturelles, eau douce...).
- **Régulation/sink** : Cette catégorie apparaît soit en tant que telle, soit divisée en deux catégories, mais renvoie à la capacité de régulation des écosystèmes : capacité à absorber et traiter les déchets ou à réguler leur processus (cycles biogéochimiques...).
- **Life support** : cette catégorie désigne la fourniture aux êtres vivants d'un « habitat » pour qu'ils puissent se nourrir, se réfugier et se reproduire. Là encore il s'agit plutôt de fonds.
- **Cultural / spiritual / health** : Cette catégorie est assez large ; elle couvre des aspects culturels, spirituels, esthétique, récréatifs ou encore liés à la santé.
- Une dernière catégorie, ajoutée par Daily (1999) correspond à la capacité à **préserver des options** pour le futur. Cette approche nous semble intéressante du point de vue de la conception.

Toutefois, selon les auteurs, les distinctions entre services et fonctions ne sont pas les mêmes, et certains processus se retrouvent classés dans des catégories de services différentes : par exemple les cycles biogéochimiques sont des services de régulation pour de Groot et des services de support pour le MEA. Boyd and Banzhaf (2007) critiquent d'ailleurs les catégories trop génériques de services, qui pour certaines correspondent à des « services finaux » et pour d'autres à des « fonctions ».

Les classifications des services écosystémiques présentées ci-dessus semblent davantage avoir été créées dans une perspective de sensibilisation à l'importance de préserver les écosystèmes que dans une perspective de gestion. De fait, les auteurs du SCEP qui ont introduit la notion de services écosystémiques en 1970 visaient à alerter les décideurs politiques et économiques sur les défaillances des écosystèmes dues aux activités humaines en les nommant. De nombreux auteurs soulignent en effet que la classification proposée par le MEA n'est opérationnelle ni pour l'évaluation économique, ni pour la gestion des écosystèmes en pratique (Boyd and Banzhaf 2007; Wallace 2007; Fisher and Turner 2008). Elle serait, plutôt qu'un instrument analytique, un inventaire des enjeux majeurs dans les relations société-biodiversité.

De manière générale, les classifications présentées ne mentionnent ni les actions à mettre en œuvre, ni les acteurs et les institutions en charge de produire et gérer les services, ou qui en bénéficient. Chaque catégorie de services recouvre des objets extrêmement hétérogènes : il peut s'agir de biens matériels (ex. : céréales) ou d'éléments abstraits (lieu sacré), dont la valeur est plus ou moins facilement perceptible par les acteurs. Les catégories englobent différents types de biens (privés, communs ou publics), qui sont appropriables ou non, qui demandent une gestion collective ou bien peuvent être gérés individuellement. Fisher *et al.* (2009) proposent d'autres types de classification des services qui seraient plus adaptés à une perspective de « gestion, maintien, restauration ou encore évaluation des services écosystémiques ». Ils citent par exemple une classification des services suivant des gradients allant de bien rivaux ou non-rivaux, ou exclusifs à non-exclusifs ; ou encore ils proposent de différencier les services selon leurs dynamiques spatiales et temporelles de manière à identifier plus clairement les gestionnaires et bénéficiaires potentiels des services. Stallman (2011) tente de catégoriser les services selon leur aptitude à être gérés collectivement ou non, en fonction par exemple de la nécessité de les gérer à l'échelle du paysage, des bénéfices attendus, ou encore du nombre et de la nature des participants à impliquer dans leur gestion.

Aujourd'hui, alors que la notion de services écosystémiques est davantage mobilisée pour repenser la gestion des écosystèmes que pour la sensibilisation à ces questions, ces confusions en

matière d'appellation, de définition et de classification deviennent problématiques. Ce problème concerne à la fois leur quantification au plan écologique, leur évaluation économique et leur intégration dans les instruments de comptabilité ou de politiques publiques, ainsi que la définition de mesures de gestion adaptées.

b. Les limites d'une approche économique des services écosystémiques

La confusion entre fonds et flux à l'origine de débats en économie

Les *ecological economists* définissent généralement les services écosystémiques comme des flux de matière, d'énergie et d'information provenant du stock de capital naturel, qui se combinent avec des services liés au capital manufacturé et au capital humain pour contribuer au bien-être de l'homme (Costanza and Daly 1992; Costanza *et al.* 1997). Selon la TEEB (2010, p. 9), « le maintien des stocks du capital naturel permet l'approvisionnement durable des flux futurs des services écosystémiques, et contribue par là même à garantir la continuité du bien-être de l'homme ».

Farley et Costanza (2010) proposent de qualifier plus finement les services écosystémiques en se référant au modèle « fonds-flux » de Georgescu-Roegen (1971). Ils différencient les biens écosystémiques (ou « *stock-flow resources* »), considérés comme des flux qui peuvent être consommés ou stockés, des services écosystémiques qu'ils qualifient de « *fund-services* ». Ils correspondent selon les auteurs à une certaine configuration de *stock-flow resources* qui elle-même va produire des flux (les auteurs s'appuient sur l'exemple de Malghan (2006) qui indique qu'une voiture est une configuration d'éléments –métal, verre, plastique...- qui fournit le service de transport). Contrairement aux biens écosystémiques, les services ne peuvent être stockés ni utilisés à un rythme totalement maîtrisé. Ainsi selon ces auteurs, ce que l'on appelle au sens large les services écosystémiques sont tantôt des fonds, tantôt des flux ; c'est-à-dire que ce sont tantôt des processus écologiques, tantôt des produits de ces processus. Lorsqu'on analyse les différentes catégories de services écosystémiques proposées dans la littérature (Tableau 4), on remarque d'ailleurs que certaines correspondent plutôt à des flux (ex. services d'approvisionnement), et d'autres à des fonds (services de support et de régulation). Or cette confusion entre fonds et flux est problématique en termes de conception, puisqu'elle ne permet pas de discerner ce qui doit faire l'objet de conception. Celle-ci sera en effet très différente si elle porte sur le fonds ou sur un flux donné. Nous y reviendrons dans la Partie 4.

La conception, un point aveugle de la littérature sur les services écosystémiques

Les services écosystémiques nécessitent un certain nombre de clarifications pour pouvoir être opérationnalisés dans des processus de conception et de gestion des écosystèmes. Cependant notre principale critique porte essentiellement sur la façon dont elle est aujourd'hui mobilisée. Avec les termes de capital naturel, de valeur économique des services, etc., la notion de services écosystémiques est totalement intégrée dans les raisonnements et les modèles économiques. Or il nous semble que l'économie ne permet pas de rendre compte de phénomènes propres au fonctionnement des écosystèmes. En effet cette discipline raisonne sur des biens clairement définis et stables. Or peut-on supposer que les services écosystémiques sont connus de façon exhaustive, et qu'ils sont stables dans le temps ?

Divers économistes soulignent que nous n'avons encore aujourd'hui qu'une connaissance partielle du fonctionnement des écosystèmes, et que nous ne connaissons pas la liste exhaustive des services écosystémiques (Westman 1977; Norgaard 2010). Ce qui est plus rarement évoqué est la possibilité d'inventer, de concevoir de nouveaux services écosystémiques. Or une telle approche est pertinente puisque ces derniers sont le résultat d'interactions entre des processus écologiques et des actions de gestion des écosystèmes. La conception de services écosystémiques peut s'appuyer sur la compréhension de nouveaux processus écologiques ou sur leur modification par l'action humaine ; elle peut aussi être liée à l'identification de nouvelles valeurs des services (liées à l'exploration de nouveaux usages) ; enfin elle peut reposer sur de nouvelles actions ou modalités d'organisation permettant de générer des services jusqu'alors inconnus.

Les approches actuelles sur les services écosystémiques, que ce soit en écologie ou en économie, font l'impasse sur la possibilité conception des services écosystémiques. Elles considèrent ces derniers comme donnés, préexistants à l'action. L'écologie élabore des modèles faisant intervenir des services préalablement identifiés. L'économie procède à l'évaluation de la valeur de services également désignés à l'avance. De même, la littérature sur la perception des services écosystémiques par les acteurs, qui vise à élaborer des méthodes et d'outils pour prendre en compte la diversité des perceptions et valeurs associées aux services (Martín-López *et al.* 2013) et pour gérer la participation des parties prenantes à l'identification des services (Bryan *et al.* 2010) n'évoque pas cette dimension de conception des services. Or concevoir un écosystème désirable ne consiste pas simplement à faire un choix optimal parmi des solutions qui existent ; cela peut consister aussi à générer de nouvelles propriétés (a fortiori de nouveaux services) pour cet écosystème.

Le fait de rendre explicite la nécessité d'une étape de conception pour la gestion d'un écosystème permet de mettre en évidence une hypothèse forte de l'approche économique des services écosystémiques, selon laquelle le fait de connaître la valeur des services et de rémunérer les acteurs en fonction les conduit à mettre en place les bonnes actions de gestion. Cette hypothèse implique d'ailleurs deux autres : (i) les acteurs que l'on rémunère ont les connaissances pour mettre en place ces bonnes actions de gestion, (ii) ceux qui conçoivent les instruments d'incitation ont les connaissances nécessaires pour d'une part cibler les services qui permettront de maintenir la durabilité de l'écosystème et d'autre part mettre en place les pratiques de gestion adéquates. Ces hypothèses sont contestables, étant données la complexité des écosystèmes et la nécessité de prendre en compte leurs spécificités locales pour la gestion. En effet de nombreux auteurs (Kremen and Ostfeld 2005; Bennett *et al.* 2009; Seppelt *et al.* 2011), soulignent que les efforts à fournir pour comprendre et connaître les processus écologiques qui sous-tendent la production de services écosystémiques restent nombreux. Cette production de connaissances est indispensable à l'identification de leviers d'action pour gérer les écosystèmes. Or l'efficacité de ces leviers est généralement dépendante du contexte environnemental et socio-économique. De plus, au-delà des travaux en écologie, des approches pluridisciplinaires impliquant des sciences sociales sont nécessaires pour rendre possible la mise en œuvre de ces leviers.

Les limites de l'individualisme méthodologique pour la conception et la gestion des services écosystémiques

La littérature sur les services écosystémiques cible essentiellement des instruments d'incitation économique individuelle. Depuis le milieu des années 1990 se développent les instruments de marché, sensés corriger les défaillances de marché : ils visent à mettre en pratique la théorie des incitations selon laquelle des agents économiques sont plus susceptibles de prendre de bonnes décisions quand ils sont incités à le faire, plutôt que lorsqu'ils sont contraints de le faire. Broughton et Pirard (2011) soulignent le fait que les instruments de marché recouvrent une grande diversité d'applications parmi lesquelles la certification et les labels (forêts, agriculture biologique, etc.), les paiements pour services écosystémiques (PSE) mis en place à travers des programmes gouvernementaux ou privés (Swinton *et al.* 2007), les mécanismes de compensation écologique, les subventions, les taxes, les mesures agro-environnementales (MAE) dans le cadre de la Politique agricole commune, l'écotourisme, etc. Une caractéristique commune est qu'ils attribuent un prix à la nature, et qu'ils soutiennent généralement les objectifs définis par les pouvoirs publics. Le succès de tels dispositifs est globalement mitigé. C'est le cas des MAE (Kleijn *et al.* 2006), notamment car elles ne ciblent que l'échelle de la parcelle pour reconstituer des processus écologiques à plus large échelle comme la préservation de la qualité de l'eau ou de

la biodiversité (Goldman *et al.* 2007; Pelosi *et al.* 2010). Par ailleurs, les marchés de droits à polluer, qui incluent le marché du carbone, induisent déjà de nombreux effets pervers (Chisholm 2010), notamment car ils ne ciblent qu'un certain nombre de flux de ressources au détriment d'autres. Depuis 2008, la CDC Biodiversité (antenne de la Caisse des Dépôts et Consignations) vend des « unités de biodiversité » à des acteurs qui polluent, au titre de la compensation des dommages environnementaux. Cependant les banques de compensation sont très critiquées par certains auteurs (Palmer and Filoso 2009) car il est très difficile d'évaluer si les compensations sont équivalentes ou non à ce qui est détruit ; le fait de reconstituer artificiellement un milieu par exemple ne garantit pas un fonctionnement écologique équivalent à celui qui a été détruit. Ainsi, lorsqu'on considère les différents modes de gestion de l'environnement : éviter, réparer, détruire et compenser, la compensation doit être choisie en dernier ressort, en anticipation d'un dommage programmé et qui ne doit couvrir que les impacts résiduels (IDDRI 2011).

L'analyse microéconomique basée sur l'individualisme méthodologique fait l'hypothèse que les acteurs agissent de façon indépendante. La solution envisagée pour les inciter à adopter de bonnes pratiques de gestion des écosystèmes est de les rémunérer individuellement. Or comment s'assurer que la somme des changements individuels de pratiques de gestion va avoir un impact efficace sur la durabilité de l'écosystème ? L'approche micro-économique néglige en effet les propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance des écosystèmes (voir Partie 1). En effet, quelle que soit la décision prise par un individu A intervenant sur un fonds écologique, celle-ci aura un impact sur celle de l'individu B intervenant sur ce même fonds. On ne peut donc pas considérer leurs décisions comme indépendantes.

Un certain nombre d'auteurs soulignent l'intérêt d'autres modalités pour gérer les écosystèmes, d'avantage basées sur des actions collectives (Goldman *et al.* 2007; Norgaard 2010; Pelosi *et al.* 2010; Stallman 2011). En effet, agir à l'échelle des écosystèmes implique la mobilisation d'acteurs multiples. Quels sont alors les modes d'organisation à adopter ? Comment gérer le fait que des acteurs privés doivent se coordonner pour produire des biens qui, en partie, sont des biens communs et publics ? Nous proposons à présent d'étudier la littérature sur la gouvernance des biens communs et des socio-écosystèmes qui, selon nous, apporte des éléments de réponse à ces questions laissées en suspens dans les approches économiques des services écosystémiques.

Le Tableau 5 récapitule les hypothèses sur la conception des services écosystémiques mises en évidence dans notre analyse de la littérature.

Les services écosystémiques	Ils sont identifiés et qualifiés lors d'inventaires impliquant ou non les acteurs locaux. Une fois qu'ils sont déterminés, leur liste n'est pas révisée
Le comportement des acteurs	Les acteurs sont supposés agir indépendamment les uns des autres. Un problème à résoudre est celui de passager clandestin
Les connaissances	Les connaissances de l'écologie permettent d'identifier les services ainsi que les moyens de les gérer. Ce qui manque est la connaissance de la valeur des services pour sensibiliser les acteurs et concevoir des instruments d'incitation.
Les actions de gestion	Elles sont variées mais connues. L'inconnu porte sur la façon d'inciter les acteurs à les mettre en œuvre
L'objet de la conception	La conception porte surtout sur les instruments d'incitation à mettre en œuvre (paiements pour services écosystémiques)

Tableau 5 : Récapitulatif des hypothèses concernant la conception des services écosystémiques dans les approches économiques

Chapitre II. Les biens communs : enrichissement des modes d'action collective, mais hypothèses contestables sur les ressources à gérer

1. De nouvelles perspectives sur l'action collective

a. La « tragédie des biens communs » dans la littérature économique

Préambule : qu'est-ce que les biens communs ?

Il convient d'emblée de distinguer le bien commun (au singulier) des biens communs (généralement au pluriel) : le premier terme renvoie à la morale ou à la philosophie, et désigne le bien-être ou le bonheur collectif d'une communauté ou encore l'ensemble des choses supposées y contribuer ; le second désigne au sens juridique ou économique des ressources échappant à la propriété individuelle et au secteur marchand, et qui sont gérées de façon collective par la communauté de ses usagers (Petrella 1996). C'est à ce dernier que nous nous intéressons ici. Les biens communs peuvent être des éléments associés au Vivant (la biodiversité), des ressources

naturelles comme l'eau, des milieux plus ou moins anthropisés (pâturages, espaces verts, aires protégées) ou des biens immatériels comme les connaissances ou les logiciels libres. Plusieurs appellations (biens communs, *commons*, *common pool resources*, *res communis*) et définitions des biens communs coexistent dans la littérature, notamment car cette notion fait l'objet de travaux dans des disciplines variées : sciences politiques, économie, géographie, anthropologie, sociologie, histoire, droit, gestion, écologie. Ces disciplines abordent les biens communs sous des angles différents, que ce soit par rapport aux caractéristiques de ces biens, ou par rapport à la manière de les qualifier ou de les gérer, de les utiliser, de les échanger, etc. Ces objets complexes font par ailleurs souvent l'objet d'approches interdisciplinaires.

Les approches par le marché ou la régulation publique préconisées par les économistes néoclassiques

Les économistes, dans la lignée des travaux de Samuelson (1954), définissent les biens communs par les caractéristiques suivantes (voir Tableau 6) :

- la non-exclusivité : il est très difficile, voire impossible, d'exclure des bénéficiaires de ce bien, par différence avec les biens privés
- la rivalité : le bien peut être dégradé lors de son utilisation, par différence avec les biens publics purs.

	Exclusion	Non exclusion
Rivalité	Biens privés	Biens communs
Non rivalité	Biens de club	Biens publics purs

Tableau 6 : La distinction entre les différents types de biens en économie selon les principes d'exclusion et de rivalité (d'après Samuelson, 1954)

Les biens communs se distinguent donc des biens publics gérés par l'État (non rivaux et non exclusifs) et des biens privés (rivaux et exclusifs), non seulement par le droit qui les régit, mais aussi par leur mode de gestion. Cependant, il faut souligner que la définition des biens communs proposée par les économistes ne concerne que les problématiques liées à l'usage du bien et non celles liées à sa production : la question de la nécessité ou non d'une production collective par exemple n'est pas mentionnée. Julie Labatut (2009) qualifie la perspective économique néo-classique des biens communs, de « naturaliste », car les biens sont considérés comme préexistants et identifiés par les acteurs, et d'« utilitariste », car selon les économistes, les acteurs cherchent à maximiser leur propre utilité (ou bien-être). Les économistes font donc l'hypothèse que les biens et les comportements sont donnés.

Selon les économistes, les biens communs, comme les externalités, peuvent entraîner des défaillances de marché, notamment car ils ne sont pas divisibles et que leur coût de production ne peut être imputé à un individu en particulier, ce qui rend difficile la fixation des prix. Les économistes traitent essentiellement les biens communs sous l'angle du problème du passager clandestin⁵⁴. L'identification de ce problème a donné lieu à un certain nombre de théories influentes dans la sphère scientifique comme politique dans les années 1960 à 1980, notamment le dilemme des prisonniers (Flood & Dresher, formalisé par Tucker(1950)), la logique de l'action collective (Olson 1965) et la tragédie des communs (Hardin 1968). Ces théories prédisent que les biens communs sont inévitablement voués à une surexploitation ou une dégradation.

Les économistes préconisent deux solutions principales pour remédier au problème du passager clandestin, en d'autres termes pour inciter les individus à changer leur comportement : d'une part la privatisation des biens et leur gestion par le marché, d'autre part la régulation publique (taxation, réglementation de l'accès au bien, etc.). Ces deux solutions ne sont d'ailleurs pas exclusives l'une de l'autre, les instruments de marché étant généralement l'expression des pouvoirs publics. De plus, le droit est nécessaire pour déterminer le rôle des autorités concernant la gestion de ces biens et les conditions d'accès, mais aussi pour mettre en cohérence les politiques publiques et les instruments de leur mise en œuvre. Les préconisations du marché ou de la régulation publique ont été reprises dans de nombreux textes et conventions internationales concernant la gestion des ressources communes de l'humanité, telles que la Convention sur la Diversité Biologique de 1992, ou les communications de la Commission Européenne de 1998 et 1999 concernant la mise en œuvre du protocole de Kyoto.

Pourtant, la privatisation des biens communs peut donner lieu à différents problèmes, tels que l'exclusion de certains acteurs générée par l'attribution de droits de propriété, ou encore les injustices et inégalités inhérentes au fonctionnement des marchés (IDDRI 2011). Elinor Ostrom⁵⁵ (1990) souligne par ailleurs que les économistes néo-classiques n'abordent pas les questions relatives aux institutions et aux connaissances sur les biens ni sur les communautés chargées de les gérer. Pourtant ces questions vont largement conditionner l'efficacité des solutions mises en œuvre. Par exemple, concernant la régulation publique, quelles sont les limites de l'autorité de l'agence centralisatrice? Comment peut-elle s'assurer de toujours sanctionner les bonnes personnes et de ne pas laisser des passagers clandestins impunis ? D'autre part, peut-elle

⁵⁴ Acteur qui obtient et profite d'un avantage obtenu ou créé par un groupe de personnes ou par la collectivité, que ce soit une situation favorable, un bien ou un service, sans y avoir investi autant d'efforts que les membres de ce groupe, ou sans acquitter leur juste quote-part ou le droit d'usage prévu.

⁵⁵ Elinor Ostrom a reçu le Prix Nobel d'économie en 2009 pour ses travaux sur les biens communs. Elle partageait ce prix avec O. Williamson.

disposer des connaissances nécessaires à la définition des bons critères de performance ? Concernant le marché, quels sont les droits (lois, règles) à mettre en place pour les faire fonctionner ? Comment mesurer les attributs des biens, notamment leur valeur ? Qui paie pour exclure les utilisateurs potentiels ? Comment gérer les conflits ? (Ostrom 1990). Ces questions conduisent l'auteur à penser que les solutions de marché ou de régulation autoritaire préconisées par nombre d'économistes ne sont pas des « panacées », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas performantes et applicables dans toutes les situations.

b. L'auto-organisation des acteurs, une troisième voie pour prendre en compte les spécificités des systèmes de ressources

La modélisation des biens communs proposée par Elinor Ostrom

Ostrom part du constat que, dans de nombreuses situations à travers le monde, des communautés parviennent à gérer durablement des biens communs sans avoir recours au marché ou à la régulation publique. Elle cherche ainsi à identifier d'autres voies pour remédier à la tragédie des communs. L'auteur s'intéresse à différents types de biens communs, qu'il s'agisse de ressources naturelles (nappes phréatiques, pêcheries, forêts, pâturages...), ou de biens d'origine anthropique (systèmes d'irrigation, connaissances...). Ostrom (1990) qualifie ces biens de *common pool resources* (CPR) qu'elle définit comme un « système de ressources naturelles ou d'origine humaine suffisamment grand pour qu'il soit coûteux (mais pas impossible) d'en exclure des bénéficiaires potentiels ». Elle distingue dans les CPR le système de ressources, qui nécessite une gestion commune en raison d'un certain nombre de caractéristiques spécifiques, et les unités de ressources, qui, elles, sont appropriables (voir : Figure 12). Elle nomme « appropriateurs » les acteurs qui prélèvent les ressources et en général gèrent le système de ressources. Ostrom modélise le système de ressources comme un « ensemble de variables de stock capables, dans des conditions favorables, de produire une quantité maximale d'une variable de flux sans nuire à la régénération du système de ressources ».

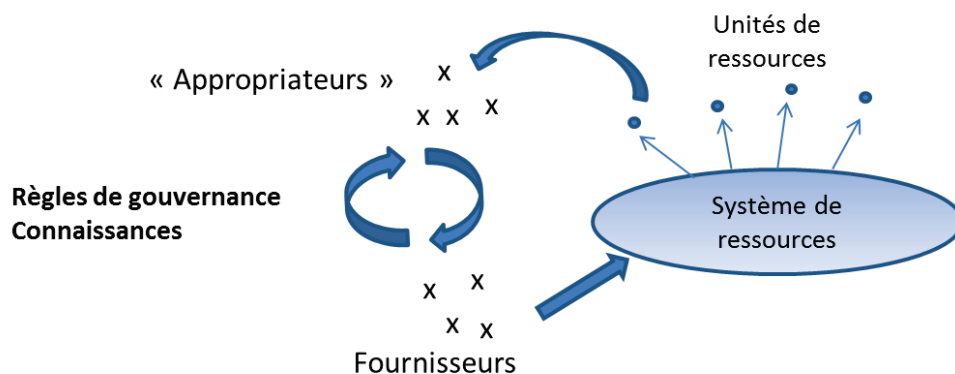


Figure 12 : Libre interprétation de la modélisation des *common pool resources* par Ostrom (1990)

Le système de ressources est géré en commun et produit des ressources qui, elles, sont appropriées. Les « appropriateurs » sont souvent confondus avec les « fournisseurs » de ressources ; ces acteurs échangent entre eux des connaissances, et leurs interactions sont encadrées par des règles de gouvernance qu'ils élaborent collectivement.

L'auteur modélise les systèmes de ressources comme des stocks qui préexistent à l'action collective, ce qui la place dans une perspective naturaliste (Labatut 2009). En revanche, contrairement aux économistes néo-classiques, elle rejette l'idée que les comportements des acteurs sont donnés, et s'intéresse aux conditions dans lesquelles ces comportements peuvent changer. Ostrom mobilise les théories néo-institutionnelles pour étudier les institutions, qu'elle définit ainsi :

« Institutions refer to the rules that humans use when interacting within a wide variety of repetitive and structured situations at multiple levels of analysis (Ostrom 2005) ».

Les institutions sont les règles, normes et valeurs, qui souvent sont conçues par des autorités gouvernementales. Cependant, Ostrom (1990) insiste sur le fait que les acteurs sont aussi capables d'élaborer des institutions de manière à instaurer une coopération pour la gestion des biens communs.

L'objectif d'Ostrom (1990) est de formuler des hypothèses sur les raisons pour lesquelles certains collectifs arrivent à s'organiser alors que d'autres échouent. Les cas fructueux sont ceux où les appropriateurs des ressources communes ont élaboré, appliqué leurs propres règles et les ont fait respecter afin de contrôler l'utilisation des CPR, et où par conséquent les ressources et les institutions ont perduré. Ostrom compare un grand nombre de situations de gestion de CPR, et mobilise diverses méthodes : analyses et méta-analyses de cas, mais aussi expérimentations et modélisations faisant appel à la théorie des jeux (Janssen and Ostrom 2006). Elle identifie huit *design principles* (voir encadré ci-après) qu'elle définit comme « éléments ou conditions essentiels au succès rencontré par ces institutions pour assurer la durabilité des ressources communes et obtenir la conformité de générations d'appropriateurs aux règles en vigueur ».

Les *design principles* d'Ostrom (1990, p. 114-115) pour une gestion durable des CPR :

1. Les limites sont clairement définies : « les individus ou ménages possédant des droits de prélever des unités de ressources d'une ressource commune doivent être clairement définis, ainsi que les limites de la ressource en tant que telle ».
2. La concordance entre les règles d'appropriation et de fourniture et les conditions locales : « les règles qui restreignent, en termes de temps, d'espace, de technologie et/ou quantité l'appropriation des unités de ressources sont liées aux conditions locales et aux obligations en termes de main d'œuvre, de matériel et/ou d'argent ».
3. Des dispositifs de choix collectif : « la plupart des individus concernés par les règles opérationnelles peuvent participer à la modification des règles opérationnelles ».
4. La surveillance : « les surveillants qui examinent les conditions de la ressource commune et le comportement des appropriateurs rendent compte aux appropriateurs ou sont des appropriateurs eux-mêmes ».
5. Des sanctions graduelles : « les appropriateurs qui transgressent les règles s'exposent à des sanctions graduelles (en fonction de la gravité et du contexte de l'infraction) par les autres appropriateurs et/ou agents travaillant pour le compte des appropriateurs ».
6. Des mécanismes de résolution des conflits : « les appropriateurs et leurs représentants disposent d'un accès rapide à des arènes locales bon marché pour résoudre les conflits entre appropriateurs ou entre les appropriateurs et leurs représentants et agents ».
7. Une reconnaissance minimale des droits d'organisation : les droits des appropriateurs d'élaborer leurs propres institutions ne sont pas remis en cause par des autorités gouvernementales externes ».
8. Des entreprises imbriquées pour les ressources communes appartenant à des systèmes plus grands : « les activités d'appropriation, de fourniture et de surveillance, d'application des règles, de résolution de conflits et de gouvernance sont organisés par de multiples niveaux d'entreprises imbriquées » (publiques et privées).

Schlager & Ostrom (1992) prennent leurs distances avec les économistes néo-classiques en insistant sur le fait que les acteurs n'ont pas nécessairement besoin d'avoir un droit d'aliénation du bien pour pouvoir concevoir les règles d'action le concernant. Par conséquent, les modalités d'exclusion ne passent pas nécessairement par le marché ; d'autres transactions sont possibles, notamment à travers des accords collectifs. Ces auteurs s'appuient sur le droit pour caractériser différents niveaux de droits de propriétés auxquels sont soumis les biens communs (accès, exploitation, gestion, exclusion et aliénation), et explorent ainsi les leviers d'action possibles sur les caractéristiques des biens en termes juridiques (voir Figure 13). Les niveaux de droits de propriété des acteurs vont conditionner leur capacité à s'auto-organiser et à faire perdurer leurs institutions. Les économistes institutionnalistes (Ciriacy-Wantrup and Bishop 1975) sont les premiers à avoir mis en évidence la confusion introduite par Hardin (1968) entre propriété

commune et libre accès. En effet celui-ci considérerait les communaux comme des biens en libre accès, alors qu'ils sont généralement détenus et gérés par une communauté, même si celle-ci n'en a pas les droits d'aliénation. Depuis, de nombreux auteurs se sont investis dans la démonstration d'alternatives possibles à la surexploitation des ressources communes.

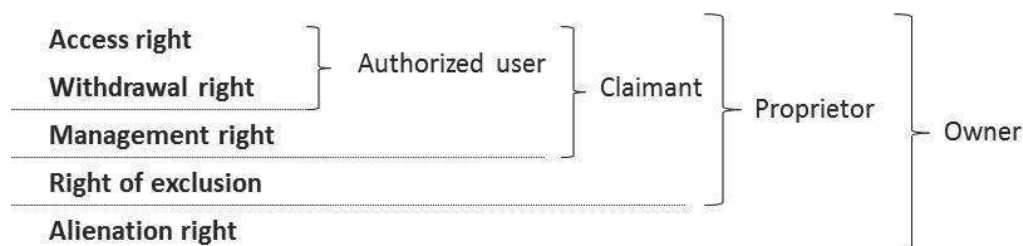


Figure 13 : Le découplage des droits de propriété des biens communs (Source : Schlager and Ostrom 1992)

Ces auteurs distinguent cinq droits de propriétés cumulables (accès, exploitation, gestion, exclusion et aliénation). Il est possible par exemple d'avoir un droit d'accès sans droit d'exploitation, un droit d'exploitation sans droit de gestion, etc. Un acteur dans cette dernière situation (*authorized user*) sera soumis à l'autorité de celui qui a le droit de gestion (*claimant*).

Le droit romain distinguait déjà plusieurs catégories de biens, aujourd'hui regroupées sous l'appellation de « biens communs » : les *res communis*, qui ne peuvent être appropriés (par ex. la mer) ; les *res nullius*, qui à un moment donné n'appartiennent à personne, mais qui peuvent être appropriés à des fins d'usage ou de consommation individuels ou collectifs (par ex. l'eau) ; les *res publica*, appartenant au peuple romain (par ex. route, fleuve national) et les *res universalis* qui appartiennent aux collectivités secondaires (par ex. thermes, théâtres, etc.). Aujourd'hui, le droit distingue plusieurs degrés de propriété (*usus, fructus, abusus*), ainsi que des règles d'accès aux biens communs. Les communaux étaient une pratique répandue au Moyen-âge. Les terres agricoles étaient dotées de différents niveaux de droits de propriété, qui parfois variaient dans le temps. Ainsi, les zones cultivées étaient privatisées le temps de la culture jusqu'à la récolte, puis ouvertes à la communauté en tant que vaine pâture. L'analyse d'Ostrom, en s'appuyant sur le droit, enrichit donc la gamme des modes d'action possibles pour préserver les biens communs.

L'Institutions Analysis Development, un nouveau cadre théorique pour analyser l'action collective

Elinor et Vincent Ostrom, ainsi que leurs collègues du *Workshop in political theory and policy analysis* (Indiana University), formant ce que l'on appelle l'École de Bloomington, ont développé le cadre théorique de l'IAD (*Institutions Analysis Development*), schématisé dans la Figure 14, pour analyser l'action collective.

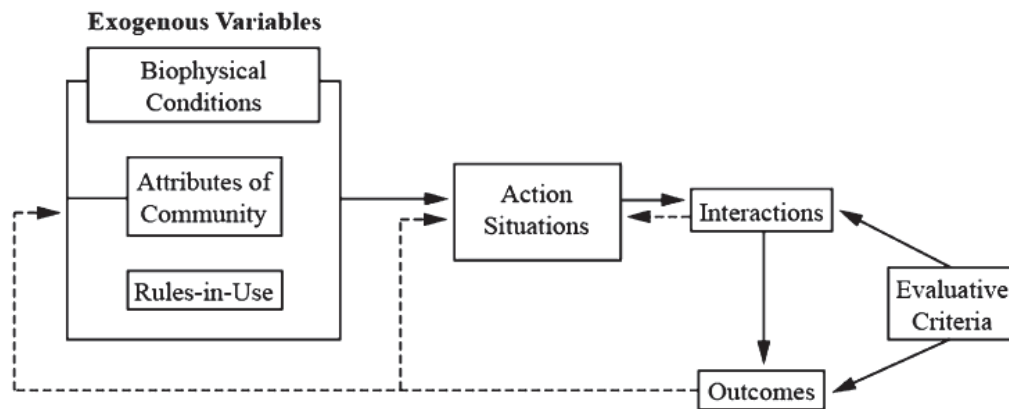


Figure 14 : Principales composantes de l'IAD Framework (source : Ostrom (2005), p. 15)

Les situations d'action sont caractérisées par la description des conditions biophysiques, des attributs de la communauté et des règles en vigueur. C'est dans ce cadre qu'ont lieu les interactions entre acteurs qui ont des résultats et implications que le scientifique peut évaluer.

La notion au cœur de ce cadre théorique est celle de « situations d'action ». Celles-ci peuvent être caractérisées par la description des conditions biophysiques, des attributs de la communauté et des règles en vigueur (règles formelles et règles d'action plus ou moins informelles). C'est dans ces situations d'action que les individus « observent des informations, sélectionnent des actions, mettent en place des interactions qui ont un certain nombre d'implications (*outcomes*) » (Ostrom 2005; McGinnis and Walker 2010; McGinnis 2011). L'IAD permet ainsi d'analyser la « boîte noire » des théories économiques néo-classiques.

La littérature sur les services écosystémiques insiste sur la dimension des savoirs en prenant en compte la complexité du fonctionnement des écosystèmes, tandis que la littérature sur la gouvernance des biens communs porte davantage sur la dimension des relations. Ces deux littératures sont complémentaires et sont d'ailleurs articulées dans l'étude des socio-écosystèmes.

c. De la gouvernance des biens communs à celle des socio-écosystèmes : comment prendre en compte la complexité et l'imprévisibilité ?

Les travaux d'Ostrom et de ses collègues nous semblent particulièrement instructifs lorsque l'on s'intéresse à la gestion des écosystèmes, dans lesquels chaque situation d'action est spécifique. Les chercheurs de l'École de Bloomington se sont d'ailleurs intéressés après les années 2000 aux socio-écosystèmes. Ils définissent un socio-écosystème comme un système écologique (système d'organismes ou unités biologiques interdépendants), étroitement lié et transformé par un ou plusieurs socio-systèmes, qui tentent de mettre en place des formes de coopération et des relations d'interdépendances entre différents acteurs (Anderies *et al.* 2004). Pour modéliser les socio-écosystèmes, ces auteurs s'inspirent de la modélisation des *common pool resources*, bien que les

SES soient considérés comme bien plus complexes et imprévisibles. Ostrom (2007; 2009) propose ainsi un modèle multi-niveau de diagnostic des socio-écosystèmes, destiné à étudier les configurations dans lesquelles les institutions peuvent conduire à une gestion durable des ressources. Ce modèle (voir Figure 15) repose sur une hypothèse de « décomposabilité » partielle des socio-écosystèmes en sous-systèmes et vise à capitaliser des données à la fois biologiques et socio-écologiques pour diagnostiquer la durabilité d'un socio-écosystème. Le cadre théorique de l'École de Bloomington étendu aux socio-écosystèmes insiste sur les propriétés spécifiques des socio-écosystèmes étudiés et de leur caractère emboîté (*nested*), donc contextualisé, ce qui exclut les prescriptions normatives. Il fournit un cadre d'analyse intégrateur pour la compilation de grandes bases de données, et favorise les approches pluridisciplinaires (Ostrom 2009).

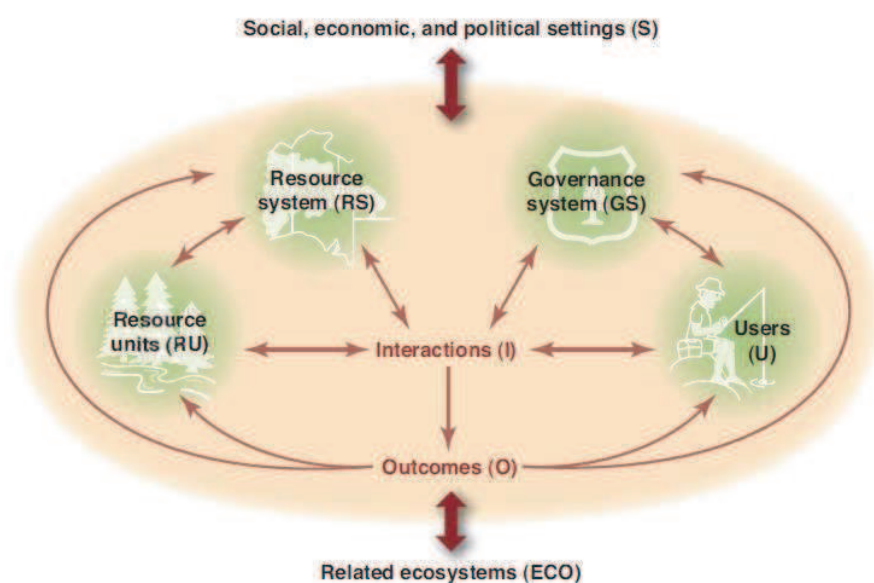


Figure 15 : Les principaux sous-systèmes du cadre d'analyse des socio-écosystèmes (SES)
(Source : Ostrom (2009), p. 420)

Représentation générale des sous-systèmes « de premier niveau » des SES, qui sont en interaction et qui affectent les configurations sociales, économiques et politiques ainsi que les écosystèmes associés : ces sous-systèmes sont le système de ressources, les unités de ressources, le système de gouvernance et les acteurs. Chaque sous-système est ensuite subdivisé en variables de second ordre et ainsi de suite jusqu'à obtenir des variables élémentaires permettant de comprendre des phénomènes.

Les chercheurs de l'École de Bloomington s'intéressent en particulier aux critères d'évaluation de la durabilité des socio-écosystèmes. Ils retiennent la notion de robustesse, définie comme le fait de maintenir la performance d'un système soit lorsqu'il est soumis à des perturbations imprévisibles, soit lorsqu'il y a des incertitudes sur des paramètres internes (Carlson and Doyle 2002). Leur approche par la robustesse se démarque des méthodes d'optimisation qui recherchent des solutions optimales, ces dernières n'étant pas adaptées à des systèmes aussi complexes et imprévisibles que les socio-écosystèmes.

Par rapport aux approches économiques classiques, les travaux de l'Ecole de Bloomington explicitent les conditions d'une action collective, et rendent visibles les enjeux de la conception de règles nécessaires au fonctionnement de cette action collective. Cependant ils font aussi un certain nombre d'hypothèses qu'il convient de souligner lorsque nous nous intéressons à la question de la nature des biens à gérer en commun.

2. Vers une « dénaturalisation » des biens communs : une analyse sous l'angle de la conception

a. Les hypothèses implicites dans l'approche d'Ostrom et de l'École de Bloomington

Nous proposons de présenter en détail une étude de cas d'Ostrom afin de mieux comprendre comment l'auteur modélise les ressources communes et le processus de conception des règles de gouvernance, mais aussi quelles sont les hypothèses sous-jacentes à son analyse.

Présentation d'un cas empirique emblématique des travaux d'Ostrom, celui des nappes phréatiques de Californie

Le cas de la gestion d'un ensemble de nappes phréatiques au sud de Los Angeles est le premier sur lequel Ostrom a travaillé, avec un certain nombre de collègues, dans les années 1950 et 1960. L'auteur a par la suite utilisé de nouvelles études menées dans les années 1980 sur ce cas pour présenter cet exemple dans son livre *Governing the Commons* paru en 1990. Ce cas nous semble particulièrement intéressant car la période d'analyse correspond à la mise en place de nouvelles institutions locales destinées à surmonter une situation de tragédie des communs.

Ostrom précise que les nappes phréatiques du sud de Los Angeles sont des biens d'une grande valeur dans cette région semi-aride, car elles fournissent de l'eau de bonne qualité et à faible coût comparé à celui de l'importation d'eau en provenance d'autres régions. De plus elles permettent de stocker l'eau en prévision de fortes demandes. L'auteur explique ensuite que la surexploitation de l'eau, entraînant un appauvrissement irréversible de la ressource et parfois des intrusions d'eau salée, menaçait l'ensemble des aquifères⁵⁶ de la région jusqu'à ce que des changements institutionnels aient été initiés par les acteurs concernés. Elle qualifie la situation initiale de « *pumping race* » qui aurait pu mener à une tragédie des biens communs. En effet, pour obtenir des droits d'exploitation de l'eau (« droits d'eau »), il fallait prouver une activité d'extraction de l'eau

⁵⁶ Un aquifère est une formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable. Il est constituée de roches perméables et capables de restituer l'eau naturellement et/ou par exploitation.

de façon continue et à des fins utiles. Or dans un contexte d'incertitude juridique, mais aussi de manque de connaissances sur les niveaux de consommation d'eau et sur la structure hydrologique des nappes, les avocats conseillaient aux exploitants de pomper autant d'eau que nécessaire jusqu'à ce qu'ils aient éventuellement besoin de se défendre devant la justice.

Ostrom montre qu'un changement s'est d'abord produit à la fin des années 1930 dans le bassin versant Raymond, le plus petit de la région, enclavé dans les terres, donc non soumis au risque d'infiltration d'eau salée. Environ 30 exploitants se partageaient la nappe phréatique en question. La ville de Pasadena était alors le principal exploitant et tenait depuis quelques années une position « de mécène dans un groupe privilégié » (Olson 1965), c'est-à-dire qu'elle supportait seule les coûts associés à une limitation de l'exploitation des ressources en eau. En 1937, cette ville a lancé une procédure judiciaire contre les autres exploitants de la nappe afin de déterminer la structure géologique du bassin et de savoir si le seuil d'exploitation soutenable de la nappe avait été dépassé ou non. L'étude hydrologique a révélé que ce seuil était largement dépassé, et le juge-arbitre a recommandé aux exploitants de réduire leur niveau de pompage. Les parties prenantes ont décidé de trouver un accord collectif afin d'éviter une procédure judiciaire qu'ils ont négocié sur la base du concept de « prescription réciproque ». Ils se sont mis d'accord pour réduire chacun leur consommation d'un quart. Ils ont également créé un marché des droits d'eau pour permettre un rééquilibrage des quantités d'eau consommées. Ostrom souligne que les parties prenantes, en négociant leur propre accord, ont mis fin à la course de pompage plus rapidement et à moindre coût que ce qu'ils auraient pu obtenir par une procédure judiciaire. Elle indique que la plupart des autres bassins d'eau souterraine de la région ont ensuite tenté de suivre l'exemple du bassin Raymond, avec plus ou moins de succès.

Ostrom cite notamment un cas d'échec des négociations, celui concernant les bassins du Comté de San Bernardino, où la surexploitation des ressources en eau a continué malgré les procédures destinées à répartir les droits d'eau et la création de districts pour la gestion de l'eau depuis les années 1950. Selon Ostrom, des différences évidentes avec le cas du Raymond Basin existent quant à la taille et la complexité de la nappe: dans le Comté de San Bernardino, certains bassins d'eau souterraine sont reliés entre eux, d'autres sont indépendants ; certains sont alimentés par une rivière, d'autres pas. En outre, la population a augmenté de façon spectaculaire à l'après-guerre et les exploitants d'eau sont nombreux. Ostrom insiste sur le fait qu'en raison de fortes incertitudes concernant les phénomènes hydrologiques, aucun consensus n'a été trouvé sur des questions-clés telles que la configuration de la nappe phréatique, les droits d'eau à créer, ou le degré d'implication des exploitants dans le dispositif administratif. En effet, selon l'auteur, les

personnes en charge des négociations ont abordé la situation comme s'il n'y avait qu'une seule réponse légitime pour chacune de ces questions, si bien que de nombreux conflits apparurent entre les parties prenantes. Finalement, aucun accord n'a été trouvé, ce qui a conduit à la suspension de l'instance de négociation en 1974. Ostrom résume l'analyse de cet échec ainsi:

“Individuals who do not have similar images of the problem they face, who do not work out mechanisms to disaggregate complex problems into subparts, and who do not recognize the legitimacy of diverse interests are unlikely to solve their problems even when the institutional means to do so are available to them.”

Analyse de ce cas et mise en évidence d'hypothèses implicites

Nous pouvons tirer de cette étude de cas quelques caractéristiques-clés des *common pool resources* étudiées par Ostrom. Tout d'abord, les ressources sont clairement identifiées: ici le système de ressources est la nappe phréatique, et l'eau potable est la seule ressource (le seul flux) visée par les institutions décrites. La communauté impliquée dans les négociations n'est composée que des exploitants de la nappe, c'est à dire des acteurs qui s'approprient les unités de ressource. Cette communauté est donc plutôt bien identifiée et les attentes des acteurs qui la composent sont homogènes par rapport aux CPR. Le bien commun préexiste à l'action collective et son importance est reconnue par tous les exploitants. L'action collective est initiée lorsque les exploitants prennent conscience de la destruction de la ressource en eau. Le problème identifié est essentiellement de maintenir le stock d'eau dans les nappes phréatiques. Deux voies sont alors possibles: d'une part limiter la consommation d'unités de ressources, d'autre part maintenir, voire améliorer le système des ressources. Ostrom insiste davantage sur la première voie, décrivant en détail comment les exploitants ont réussi à trouver un accord sur les prescriptions mutuelles.

Toutefois, alors que l'auteur mentionne par ailleurs la conception de solutions innovantes, telles que la mise en place de marchés de droits d'eau ou la construction d'une barrière artificielle contre les intrusions d'eau salée à partir de puits d'injection d'eau douce, elle ne met pas l'accent sur les défis liés à l'émergence et à la gestion de telles innovations, notamment les difficultés rencontrées par les acteurs lorsqu'ils ont cherché à développer de telles solutions, les solutions alternatives proposées ou encore la définition collective de critères de sélection. Par ailleurs, l'étude de cas révèle que la nature des CPR change au cours du processus de négociation: au début il s'agit de la nappe d'eau souterraine ; puis à celle-ci s'ajoute des canaux construits pour détourner des rivières vers le bassin versant, et les puits d'injection d'eau douce créés pour limiter les intrusions d'eau salée. Ces nouvelles infrastructures font alors partie des CPR analysés et doivent être pris en compte dans la conception des institutions. Or ceci n'est pas spécifiquement mentionné par Ostrom, ce qui nous donne une vision plutôt statique des CPR gérés.

Enfin, Ostrom insiste sur le fait que les institutions conçues par les exploitants dépendent fortement de leurs connaissances sur les ressources communes. Un déficit de connaissances sur le système des ressources et le manque de consensus sur sa représentation semblent être des obstacles majeurs à la conception d'institutions permettant de gérer durablement les ressources. En effet ce type de consensus peut être une condition nécessaire à l'application de méthodes de résolution de problèmes qui sont celles envisagées par l'auteur (voir citation sur la justification de l'échec dans le cas du bassin de San Bernardino rappelée précédemment). Or la résolution de problème est-elle toujours la méthode la plus appropriée dans un contexte de manque de connaissances sur le bien à gérer ou de grande incertitude ?

L'analyse détaillée d'une étude de cas d'Ostrom nous permet de mettre en évidence que les biens communs qu'elle étudie correspondent à une catégorie particulière d'objets pouvant être gérés en commun (voir Tableau 7). Tout d'abord, les ressources sont considérées comme «naturelles» ou traditionnelles et stables, c'est à dire que leur identité ne change pas radicalement au fil du temps. Les systèmes de ressources sont assez facilement délimités, et les communautés qui les gèrent sont relativement homogènes et identifiées. De plus, les institutions élaborées par la communauté ciblent généralement un seul type de ressources (ou de flux) produites par le système de ressources. Les utilisations potentielles sont considérées comme connues et la valeur des ressources communes est reconnue par la communauté. Par ailleurs l'acquisition des connaissances sur le système de ressources et sur son fonctionnement ne semble pas constituer une limite pour la mise en place de ces règles de gestion. La connaissance requise peut être produite par essais-et-erreurs, ou bien des experts sont mobilisables pour les produire (c'est le cas ici des bureaux d'étude qui réalisent les expertises hydrologiques). Les actions de gestion sont essentiellement ciblées sur la limitation du prélèvement de ressources ; ce sont les arrangements pour arriver à l'appliquer collectivement qui sont difficiles à élaborer et qui font essentiellement l'objet de l'analyse d'Ostrom. Cette analyse met en évidence que dans les travaux d'Ostrom, à l'instar de la littérature sur les services écosystémiques, la conception du bien lui-même ou des actions nécessaires à sa gestion est un point aveugle ; l'analyse de processus de conception est focalisée sur l'élaboration des règles de gouvernance.

De même, le modèle proposé par Ostrom et ses collègues sur la gestion des socio-écosystèmes est un outil de diagnostic, plutôt descriptif. La reproduction des ressources est reconnue comme étant une combinaison de processus naturels, dynamiques et souvent imprévisibles, et de processus socio-économiques, tels que les formes d'organisation et d'appropriation à des niveaux individuels ou collectifs, la capacité de substituabilité de ressources, etc. Cependant ces socio-

écosystèmes, comme les *common pool resources*, sont considérés comme des stocks de ressources dont il faut limiter le prélèvement. Le modèle d'Ostrom permet de compiler des données précises sur les systèmes écologiques, mais il n'en caractérise pas le fonctionnement. Les solutions de gestion des écosystèmes mentionnées par les auteurs sont essentiellement de limiter le prélèvement des ressources. Par ailleurs, ce modèle est plutôt utilisé pour des analyses ex-post de situations de gestion (Ostrom 2007), ou encore pour faciliter l'apprentissage continu et la gestion adaptative, basée sur l'essai-erreur (Anderies *et al.* 2007). Or de telles méthodes sont adaptées à la conception réglée (Le Masson *et al.* 2006), dans des situations où les objets sont relativement stables et les connaissances accessibles, mais pas à la conception innovante visant à envisager des solutions en rupture avec l'existant.

Les biens	Ils préexistent à l'action collective. Ce sont des « stocks » à préserver ; ils sont considérés comme stables. Le système de ressources est facilement délimité, une seule ressource est ciblée.
La communauté	Elle est identifiée et relativement homogène : consensus sur la valeur du bien.
Les connaissances	Le manque de connaissances sur le système de ressources est un obstacle majeur à la mise en place des institutions. Des experts légitimes existent.
Les actions de gestion	Elles consistent essentiellement à limiter l'exploitation des ressources et maintenir la capacité de régénération du système, de façon à préserver le stock. Elles peuvent être déterminées par essai-erreur.
L'objet de la conception	La conception porte surtout sur les règles de gouvernance

Tableau 7 : Récapitulatif des hypothèses identifiées dans les travaux d'Ostrom sur les *common pool resources*

On pourrait imaginer quantité d'autres situations où il n'y aurait pas de communauté constituée, où la valeur des biens à gérer ne serait pas connue ou reconnue initialement par les acteurs, et où les actions de gestion à mettre en œuvre seraient plus complexes que la limitation du prélèvement de ressources. Ainsi, les situations dans lesquelles les biens communs ne préexistent pas à l'action collective, ou encore dans lesquelles l'intérêt collectif est difficile à déterminer, ne semblent pas pouvoir être traitées avec le cadre théorique d'Ostrom. Or ce type de situations est représentatif

de situations d'innovation collective, où le bien commun n'est généralement pas prédéfini et doit faire l'objet d'une conception. Il pourrait être soit préalable aux situations étudiées par Ostrom (les biens communs ne seraient pas encore perçus comme tels), soit plus général que les cas modélisés par Ostrom.

b. L'émergence d'une littérature sur les biens communs à concevoir

Qu'il s'agisse des approches en économie, en sciences politiques ou en droit, une même hypothèse est faite : les biens communs sont considérés comme préexistants à l'action collective et comme donnés. Les logiques étudiées sont celles de la protection et de l'accès au bien plutôt que celles de leur production, de leur évolution ou de leur transformation au cours du temps. Cette hypothèse « naturaliste » (Labatut 2009) est réfutée par un certain nombre de travaux en sciences de gestion.

Les travaux de Labatut (2009) en sciences de gestion ouvrent une voie nouvelle qui vise à dénaturer, à « artéfactualiser » (Hatchuel 2000b) le bien commun ainsi que l'action collective visant à le produire et à l'utiliser. Pour cela, la perspective proposée dans sa thèse est de considérer les biens communs comme résultant d'un processus de conception, et d'analyser ce dernier, en particulier à travers l'instrumentation (au sens large, *i.e.* instruments de gestion, règles, normes...) mise au point par les acteurs pour qualifier, développer, entretenir ce bien commun. Labatut (2009) s'intéresse aux races animales locales comme biens communs. Elle adopte une perspective généalogique de manière à comprendre comment l'action collective s'est mise en place et transformée au cours du temps. La thèse analyse notamment les processus d'apprentissage ayant permis la co-construction des collectifs et des objets de gestion des biens communs, constituant ce qu'elle qualifie de « dispositifs coopératifs ». Elle met aussi en évidence les crises de la coopération et les déstabilisations de l'action collective dont elle cherche à comprendre les causes. Ainsi dans la perspective de Labatut, le bien commun n'est pas donné et stable, mais il est dynamique et se transforme. Surtout, il nécessite des actions de conception, de gestion, de qualification, etc., qu'il est important de rendre visibles car elles sont généralement sous-estimées dans les approches classiques des biens communs.

Hannachi (2011) étudie l'émergence d'une vision du territoire comme bien commun par un ensemble d'acteurs en compétition, les établissements de collecte et de stockage dans le secteur agricole. Selon l'auteur, le territoire est une « ressource productive commune à ces entreprises tout en étant un lieu d'enracinement ». C'est une « combinaison d'attributs physiques (ressources productives : conditions pédoclimatiques, écosystémiques...) et d'attributs symboliques (culture locale, attaches identitaires, effets de proximité, réputation collective sur le marché...) »

(Hannachi, 2011, p24). Certains avantages liés au territoire comme les effets de proximité bénéficient à tout le monde et à personne en particulier ; or ils peuvent être dégradés par le mauvais comportement d'une entreprise (épuisement ou pollution de la ressource, détérioration de la réputation collective ou encore disparition de la confiance entre les opérateurs). L'auteur montre que le territoire peut être perçu comme bien commun à partir du moment où les acteurs en identifient des propriétés pouvant leur procurer un avantage compétitif. Le territoire comme bien commun est alors un construit social.

D'autres travaux en sciences de gestion s'intéressent à des biens communs faisant l'objet d'une conception ; ce sont ceux portant notamment sur les biens communs numériques, par exemple les logiciels libres. De tels objets nécessitent l'investissement personnel de plusieurs individus, généralement non rémunérés, dont la production est rendue accessible gratuitement au public à travers internet. O'Mahony (2003) précise que ces objets ont à la fois un caractère de biens publics produits par des privés (Kollock 1998), car ce sont des biens non-exclusifs et non-rivaux, et des propriétés de biens communs, car ils sont soumis à des menaces de type « enclosure » par des phénomènes de *hijacking* (une personne ajoute au code collectif un code privé et tente de tout s'approprier). Un certain nombre de travaux analysent les motivations des acteurs privés à contribuer à produire ces biens communs (Benkler 2002; Johnson 2002; Benkeltoum 2009). Ils identifient des motivations variées, telles que l'altruisme, l'amusement, la réciprocité ou encore les avantages procurés pour leur recherche d'emploi ou pour leur évolution de carrière. Von Krogh (2003) montre que parallèlement à la production d'un bien public, de tels projets permettent de développer un pôle de ressources communes, mais aussi des bénéfices qui augmentent en fonction de l'implication des individus: la réputation, le contrôle technologique et l'apprentissage. D'autres travaux sur les logiciels libres visent à comprendre les règles mises en place pour maintenir l'ouverture de ces biens au public sur le long terme et prévenir les phénomènes d'« enclosure » (O'Mahony 2003; Hess and Ostrom 2007). O'Mahony (*ibid.*) montre notamment que les contributeurs à la conception de logiciels libres développent des stratégies innovantes en matière de propriété intellectuelle pour éviter l'appropriation, permettre aux investisseurs de gagner un retour sur investissement, mais aussi inciter les innovateurs à travailler pour l'intérêt général et leur permettre de préserver leur identité collective et leur réputation.

Ces auteurs nous conduisent à penser que les travaux sur les biens communs numériques ne portent pas réellement sur les difficultés de conception collective de ces biens en termes d'apport de connaissances, de définition de l'objet à concevoir, etc. Ils les abordent plutôt sous un angle analogue à la littérature sur les biens communs considérés comme naturels ou donnés.

c. Un enjeu scientifique et managérial : traiter des situations dans lesquelles une action collective est nécessaire, mais pour lesquelles il n’y a pas de bien commun identifié

Selon Hess and Ostrom (2007), une action collective émerge lorsqu’il est nécessaire de combiner l’effort de deux individus ou plus pour atteindre un objectif, et implique que chaque individu s’investisse volontairement. On peut alors se poser la question de ce qui déclenche l’action collective. Dans le cas de la gestion des nappes phréatiques de Californie étudié par Ostrom (1990), la ressource préexiste à l’action collective. Cependant, l’action collective n’est déclenchée que lorsque les acteurs prennent conscience d’une part que la ressource est dégradée, et d’autre part qu’il est nécessaire d’agir en commun pour remédier à ce problème. De même, dans tous les autres cas de biens communs passés en revue précédemment, l’action collective est déclenchée lorsque les acteurs prennent conscience d’une menace pesant sur le bien commun. La prise de conscience de la menace semble donc à la fois faire émerger le bien commun et déclencher l’action collective. Cependant dans les travaux mentionnés, la reconnaissance du bien commun par les acteurs ne semble pas poser problème. Les travaux s’intéressent davantage à la façon dont les acteurs s’organisent, mettent en place des règles de coopération, de surveillance etc. une fois que le bien commun est identifié. Labatut (2009) et Hannachi (2011) identifient dans les situations qu’ils ont étudiées la nécessité d’un acteur tiers pour faire émerger au sein du collectif une vision partagée du bien commun, mais ils ne décrivent pas le processus de conception nécessaire pour faire émerger le bien commun.

Il existe des situations dans lesquelles un ensemble d’acteurs est face à des crises non résolues, pour lesquelles il faudrait mettre en place une action collective, mais où les biens communs qui justifieraient cette action collective ne sont pas facilement identifiables. Dans de telles situations, les acteurs sont généralement plutôt divisés sur la question à traiter et les objectifs à atteindre, voire sont en conflit. C’est bien le cas de la crise environnementale des agro-écosystèmes : les acteurs en charge de les gérer ne constituent pas un collectif et sont mus par des intérêts variés. Ce type de situations que nous décrivons pourrait être en réalité préalable aux situations de gestion des biens communs actuellement étudiées dans la littérature. Il s’agit notamment de situations caractérisées par une grande incertitude et un manque de connaissances important, dans lesquelles les objets de la coopération, les collectifs et leurs objectifs doivent être simultanément conçus.

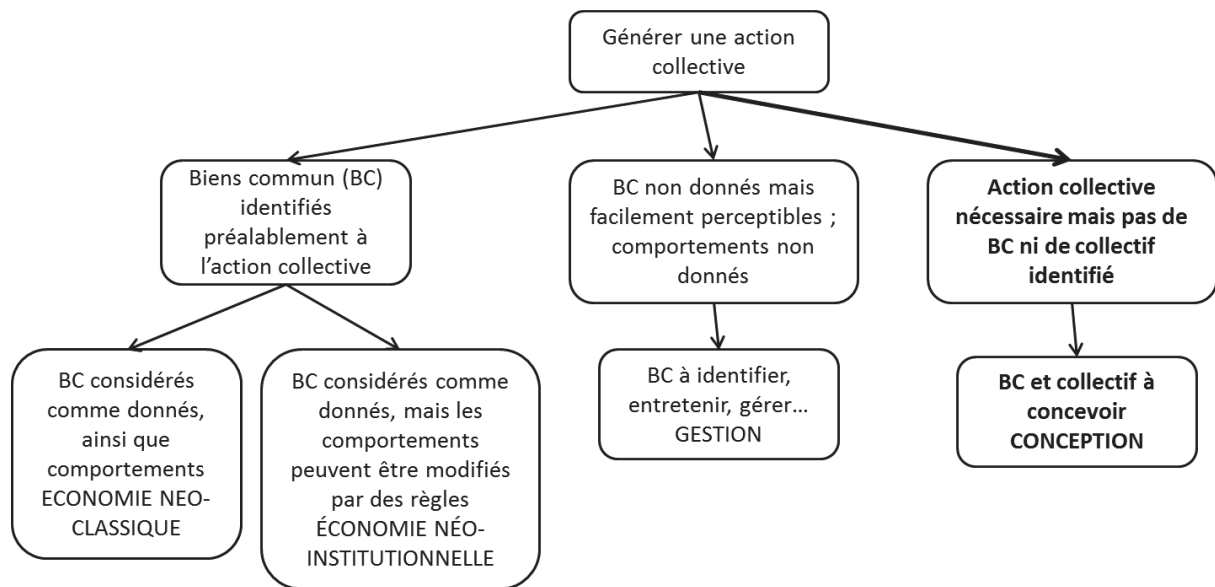


Figure 16 : Représentation schématique des différents courants de la littérature sur les biens communs, selon si les biens communs et les comportements sont considérés comme donnés ou non.

Conclusion de la Partie 2

Dans cette deuxième partie de la thèse, nous n'avons pas cherché à brosser un état de l'art exhaustif, ni sur la notion de services écosystémiques, ni sur celle de biens communs. Nous avons analysé les acquis nous paraissant les plus féconds pour éclairer les aspects majeurs de notre problématique de la conception des agro-écosystèmes. C'est pourquoi, par exemple, nous avons insisté plus particulièrement sur les travaux d'Ostrom. L'intérêt de la notion de services écosystémiques est grand, par rapport à la notion d'externalités notamment, pour qualifier ce qui est dégradé par les activités humaines et pour rendre visibles les processus complexes liés au fonctionnement des écosystèmes. On comprend l'intérêt de cette notion pour mieux sensibiliser les décideurs publics et économiques à ces questions. Toutefois la confusion sur le concept même de services écosystémiques et les hypothèses faites sur les écosystèmes lorsque les services sont intégrés dans des logiques économiques rendent difficile l'opérationnalisation de la notion.

L'analyse de la littérature sur les biens communs met en évidence que les *common pool resources* modélisées par Ostrom sont des biens très spécifiques qui ne permettent pas de rendre compte de la complexité du fonctionnement des écosystèmes et, a fortiori de l'action collective dans la gestion des agro-écosystèmes.

Dans ces deux champs de recherche, les enjeux de gestion et de conception sont souvent implicites. Les hypothèses qui sont faites sur la connaissance des actions à mener pour entretenir

les écosystèmes ainsi que sur les formes d'organisation adaptées au développement de ces actions de gestion sont particulièrement fortes. La portée des acquis en est ainsi amoindrie, le domaine de pertinence des cas traités et le domaine de validité des apports sont limités d'autant. Finalement, l'intérêt de cette revue de la littérature est bien sûr de montrer les apports dans ces deux champs, mais il est surtout de montrer ce qu'ils ne traitent pas, soit parce qu'ils en font l'impasse, soit parce que les cas d'école modélisés ne permettent pas de les traiter.

Partie 3 : De la prise en compte de l'environnement à la conception d'un agro-écosystème : analyse d'un cas empirique en région d'agriculture céréalière intensive

Introduction de la Partie 3

Nous présentons dans cette troisième partie les résultats de l'analyse d'un cas archétypique d'agriculture intensive aux prises avec une problématique environnementale. L'étude et le suivi d'une situation empirique visent à dégager la nature des difficultés que rencontrent les acteurs sur un territoire donné, lorsqu'ils cherchent à mener une action collective pour soutenir un processus d'innovation à l'échelle d'un agro-écosystème, avec l'objectif de concilier agriculture et environnement.

Nous avons suivi le montage d'un projet dans lequel sont impliqués un centre de recherche en écologie et une coopérative agricole. Il consiste à mettre en place une filière courte de luzerne destinée à augmenter cette culture intéressante au plan environnemental. Nous avons analysé tout d'abord les motivations initiales de ces acteurs pour engager leur action commune. Elle consistait à internaliser un service écosystémique (en l'occurrence la préservation d'une espèce d'oiseau patrimoniale) principalement par une démarche de contractualisation. Nous montrons que cette démarche conduit à un blocage du processus d'innovation.

La recherche-intervention que nous avons menée ensuite a consisté à proposer l'application d'une méthode de conception collective tirée de la théorie C-K et centrée sur la luzerne. Nous évaluons son potentiel et les enjeux managériaux pour surmonter le blocage identifié. Nous vérifions ainsi la pertinence et les conditions d'efficacité d'une posture de conception innovante, qui ne considère pas l'ensemble des valeurs et des options de gestion possibles comme connu à l'avance, mais demande de ré-ouvrir le champ des possibles.

Chapitre I. Un archétype de l'agriculture intensive à la recherche d'une transition environnementale

1. Préambule : le choix de l'étude de cas

Lors de l'élaboration du protocole de recherche, il était question de conduire au cours de la thèse différentes études de cas. Pour être adaptés à notre problématique, les cas devaient satisfaire aux critères suivants :

- prendre en compte une diversité de services écosystémiques,
- porter sur la conception de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement,
- revêtir une portée territoriale et, en même temps concerner une filière agroalimentaire (une entreprise coopérative semblait donc particulièrement adaptée à ce critère),
- concerner des démarches innovantes, pionnières, dont on pouvait tirer des enseignements.

Dans un premier temps notre attention a été attirée par trois projets innovants visant à concilier agriculture et environnement, menés par des coopératives agricoles différentes. Finalement, nous avons concentré notre dispositif sur une seule étude de cas⁵⁷, en l'occurrence un projet mené par la Coopérative Entente Agricole (CEA) avec le Centre d'Etudes Biologique de Chizé (CEBC). Notre idée était d'entreprendre une démarche longitudinale, propice à la recherche-intervention. Nous avons alors décidé d'approfondir le plus possible la confrontation entre l'analyse théorique et l'analyse empirique.

Centrer notre investigation empirique sur ce seul cas ne nous a pas semblé devoir entraver notre démonstration, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le cas considéré satisfait de près aux critères de sélection prédéfinis :

- l'agriculture qui est concernée par la coopérative étudiée est représentative d'une agriculture intensive et spécialisée dans les grandes cultures, où les enjeux environnementaux sont multiples : biodiversité, eau, qualité des sols, protection intégrée des cultures, etc. ;
- les enjeux de préservation de la biodiversité et de la qualité de l'eau font l'objet d'une forte mobilisation au niveau local : des recherches sont menées sur ces questions depuis

⁵⁷ Le premier projet s'est arrêté assez rapidement pour des raisons propres à la coopérative. Le second avait commencé plusieurs années avant le début de la thèse ; nous pensions l'utiliser pour mener une brève analyse basée sur des entretiens et l'utiliser à des fins comparatives, mais cela n'a pas pu être le cas.

près de deux décennies et divers instruments de politiques publiques ont été développés et testés

- il revêt bien une logique de territoire : la zone de collecte de la coopérative couvre une surface assez étendue (17 000 ha), à l'échelle de laquelle peuvent être coordonnées les nouvelles pratiques agricoles et organisations nécessaires au projet ;
- le projet consiste à mettre en place une filière courte de luzerne, culture particulièrement intéressante au plan environnemental. L'implication de la coopérative, acteur économique des filières agro-alimentaires, permet d'analyser le rôle et les leviers d'action possibles au niveau des filières et au niveau territorial pour la coordination d'actions en faveur de l'environnement.

Ensuite, le projet est particulièrement ajusté à notre problématique de recherche sur la conception. Il repose sur la coopération entre un centre de recherche en écologie et une coopérative agricole. Cette coopération s'est mise en place dès la conception et le montage du projet, et s'est poursuivie dans sa phase de réalisation. Par ailleurs, ayant travaillé préalablement (lors d'un stage de Master recherche), avec ce centre de recherche, nous avons pu d'une part analyser les efforts de conception menés depuis plusieurs années par les écologues, d'autre part observer l'émergence et la conduite de la coopération entre ces deux acteurs. Le projet a démarré avec la thèse en octobre 2010, ce qui a rendu possible la mise en place d'une recherche-intervention (Hatchuel and Molet 1986; Hatchuel and David 2007) de manière à accompagner la mise en œuvre du projet et à en tirer des enseignements. La réalisation du projet, mais aussi sa conception restant largement à définir à ce moment-là, il était pertinent d'utiliser des théories et des méthodes de conception, telles que celles développées à Mines Paristech (Hatchuel and Weil 2003; Hatchuel and Weil 2009). L'objectif de la recherche-intervention était de soutenir l'exploration collective de solutions innovantes dans le cadre du projet.

2. Un cas archétypique : une plaine de culture intensive à l'épreuve de la crise environnementale

La zone d'étude est une plaine de grandes cultures représentative des régions d'agriculture intensive en France, dans lesquelles les dommages sur l'environnement, en particulier l'eau et la biodiversité sont aujourd'hui largement reconnus (IFEN 2002; Meynard *et al.* 2002), notamment en raison de l'utilisation massive de produits phytosanitaires, de l'augmentation des terres irriguées et de la simplification des assolements. Ce territoire a retenu notre attention car c'est un lieu privilégié de mise en œuvre d'actions en faveur de la préservation de l'environnement, étant donné la présence d'espèces menacées et de problèmes liés aux ressources en eau. On peut noter

en particulier la mise en place d'une zone Natura 2000 à laquelle sont associées des mesures agro-environnementales, et des Aires d'Alimentation de Captage⁵⁸ considérées comme prioritaires par le Grenelle de l'environnement. Par ailleurs il s'agit d'un territoire sur lequel les efforts de recherche sont importants, notamment en raison de la présence d'un laboratoire en écologie du CNRS et d'unités de recherche de l'INRA, et d'une Zone Atelier dont nous allons préciser les caractéristiques par la suite.

Caractéristiques physiques et agricoles de la zone d'étude

La zone d'étude regroupe des plaines céréalières situées au Sud de Niort en Poitou-Charentes, elle couvre une zone située au sud du département des Deux-Sèvres et au nord de la Charente-Maritime. La plaine de Niort ainsi que les plaines de l'Aunis et de la Saintonge, sont de vastes plateformes calcaires ondulées, d'altitude comprise entre 5 et 60 m, entaillée par différentes rivières. Ce sont des régions à paysage ouvert aujourd'hui dédiées aux grandes cultures. Le pays Mellois, également compris dans la zone d'étude, est également ondulé, mais est constitué de plateaux d'altitude moyenne de 150 m, traversés par une rivière, la Boutonne, et ses affluents. Le relief un peu plus marqué et les haies de châtaigniers modèlent le paysage semi-bocager où domine la polyculture-élevage (source : livret chambre d'agriculture Deux-Sèvres et Charente Maritime).

On distingue dans cette région deux grands types de terres :

- Les terres de groies caractéristiques des plaines de Niort et de l'Aunis, qui sont des sols argilo-limoneux, calcaires, caillouteux et de faible profondeur (10 à 25 cm). Ce sont des rendosols⁵⁹ formés à partir d'une roche calcaire du Jurassique, qui forme une « banche plate calcaire resserrée » laissant difficilement passer le système racinaire des végétaux. Ils sont bien pourvus en matière organique, mais celle-ci est majoritairement fossilisée et n'intervient que très peu dans les propriétés structurales des sols. La réserve utile de ces sols est donc très faible, si bien qu'ils sont très sensibles aux déficits hydriques (les sols sont dits « séchants »). De pH élevé (>7,8), ces sols ont un caractère filtrant qui les rend sensibles à la lixiviation de minéraux vers les nappes phréatiques.

- Les terres rouges à châtaigner, présentes essentiellement sur le Plateau Mellois, sont constituées de 30 à 80 cm d'épaisseur de limons sur des argiles rouges profondes et acides, bien qu'issues du démantèlement de roches calcaires. Ces terres ont une bonne réserve utile (100 à 150 mm) mais sont sensibles à la battance.

Le climat est océanique ; il est caractérisé par une température moyenne de 12°C, un fort ensoleillement (plus de 1800h par an) et une précipitation annuelle moyenne de 750-900 mm, avec de forts déficits hydriques en été et parfois au printemps. Des restrictions d'irrigation sont mise en place presque chaque année depuis les années 1990.

La Région Poitou-Charentes est la troisième région céréalière en France. Avec 7 exploitations sur 10 qui produisent des céréales, le secteur céréalier régional représente 8 % de la production nationale de blé tendre et près de 10 % de

⁵⁸ Une Aire d'Alimentation de Captage (AAC) correspond aux surfaces sur lesquelles l'eau qui s'infiltré ou ruisselle participe à l'alimentation de la ressource en eau dans laquelle se fait le prélèvement ; elle est définie sur des bases hydrologiques ou hydrogéologiques. Créées dans le cadre de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006, ces zones de protection quantitative et qualitative de l'eau sont destinées à lutter contre les pollutions diffuses d'origine agricole et non agricole.

⁵⁹ Un rendosol est un sol peu épais formé sur roche-mère calcaire, riche en matières organiques et en carbonates, foncé et grumeleux.

celui du maïs-grain, avec des surfaces respectives de 381 350 et 148 350 hectares. Entre 1970 et 2000, l'irrigation s'est fortement développée en Poitou-Charentes comme dans la plupart des régions françaises. Toutefois, en raison de la récurrence de déficits hydriques, la tendance s'inverse au début des années 2000. En dix ans, la part de surface irriguée dans la SAU est passée de 9,6 % à 8,6 % (Source : Agreste 2013⁶⁰). La région Poitou-Charentes assure par ailleurs 12,6 % de la production nationale en oléagineux. Les surfaces en tournesol représentent 165 250 hectares et le colza couvre 118 250 hectares (Source : Région Poitou-Charentes⁶¹). En ce qui concerne l'élevage, il s'agit de la première région caprine européenne, avec 271 000 chèvres, soit 32% du troupeau français. Les autres types de productions animales ont diminué : le cheptel ovin allaitant ne représente plus que 9 % du cheptel national ; la filière bovine allaitante 5,2 % du troupeau national, et les effectifs en vaches laitières 2,8% de l'effectif national.

Les plaines céréalières de la zone d'étude connaissent depuis une cinquantaine d'années un mouvement d'intensification de l'agriculture et de spécialisation dans les grandes cultures qui s'est accéléré au cours des dernières décennies. La polyculture-élevage disparaît progressivement au profit des grandes cultures céréalières, et avec elle des productions pluriannuelles telles que la luzerne et les prairies de graminées. Ainsi, dans les plaines du sud de Niort, alors que 60 % des parcelles agricoles étaient occupées par des prairies (artificielles, temporaires ou permanentes) en 1970, 15 % subsistent en 2007⁶². La spécialisation dans les grandes cultures a également entraîné une simplification des assolements, le blé et le colza revenant souvent dans les rotations. Le remembrement des parcelles agricoles a favorisé l'arrachage de la plupart des haies et l'agrandissement des parcelles cultivées, entraînant une multiplication par 10 de la taille des parcelles. L'intensification agricole a par ailleurs favorisé une utilisation croissante d'intrants chimiques (produits phytosanitaires et fertilisants).

Les plaines agricoles de la région Poitou-Charentes abritent une grande richesse biologique, notamment en termes d'espèces ayant une valeur patrimoniale. Dans les Deux-Sèvres, la plaine de Niort Sud-est accueille 17 espèces d'oiseaux menacées à l'échelle européenne, dont 6 sont présentes dans des proportions importantes : l'outarde canepetière, l'œdicnème criard, le hibou des marais, le busard cendré, le busard Saint-Martin et le busard des roseaux. La plaine abrite également 10 espèces rares ou menacées à l'échelle régionale. Pour beaucoup d'oiseaux, c'est une zone de nidification. C'est aussi un site de rassemblements postnuptiaux pour les outardes canepetières et les œdicnèmes criards. Enfin il s'agit pour diverses espèces d'intérêt communautaire d'une zone d'étape en période de migration, ou encore d'une zone d'hivernage.

⁶⁰ <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R5413A04.pdf>

⁶¹ <http://www.poitou-charentes.fr/agriculture/presentation-secteur/poids-economique.html>

⁶² Chiffres indiqués dans le projet « Quels indicateurs pour évaluer l'efficacité de NATURA 2000 », CEBC, 2007

Encadré : Les enjeux de la conservation de l'outarde canepetière

Parmi ces espèces d'oiseaux menacées, l'outarde canepetière (*Tetrax tetrax*) fait l'objet de préoccupations particulières en termes de conservation. Elle est considérée comme étant « en danger » au niveau national (Jolivet and Bretagnolle 2002), vulnérable dans le Livre Rouge des Oiseaux d'Europe, et elle figure sur l'annexe 1 de la Directive Oiseaux (Inchausti and Bretagnolle 2005). Elle a longtemps constitué un gibier de plaine, mais elle est protégée en France depuis 1972. Sa population européenne est estimée entre 120 000 et 300 000 individus. La péninsule ibérique, en particulier l'Espagne, regroupe quatre cinquièmes des effectifs. A l'origine, l'outarde était inféodée aux zones steppiques telles que la Crau⁶³, mais elle s'est progressivement adaptée aux régions de polyculture-élevage (Latraube and Boutin 2008). Aujourd'hui la région Poitou-Charentes concentre 90% de la population d'outarde canepetière migratrice en France (DOCOB ZPS Plaine de Niort Sud-est⁶⁴). A la fin des années 1970, des ornithologues de la Ligue pour la protection des oiseaux (LPO) et de l'Office national de la chasse (ONCFS) ont commencé à suivre les populations d'outarde canepetière en plaine céréalière de Poitou-Charentes. Ils ont identifié une accélération du déclin de cet oiseau de façon analogue à ce qui s'est passé dans le bassin parisien trente ans plus tôt. En 1995, la LPO a mené une enquête au niveau national sur les effectifs d'outarde canepetière : d'une estimation de 7200 mâles chanteurs en 1980, on est passé à 1320 en 1996. Cette diminution a surtout concerné les milieux agricoles, avec près de 92 % de diminution des effectifs en 20 ans (Jolivet and Bretagnolle 2002; Bretagnolle and Inchausti 2005); à l'inverse, la population de la Crau est restée stable depuis 1980 (Wolff 2001).

Le constat du déclin de l'outarde canepetière et d'un cortège associé d'oiseaux de plaine a conduit progressivement à la mise en place d'actions de conservation dans le cadre de la Directive Oiseaux, prolongées avec la mise en place de Natura 2000. La Zone de protection Spéciale (ZPS) Plaine de Niort Sud-Est, tout comme les 7 autres ZPS désignées dans les plaines céréalières de Poitou-Charentes, a été délimitée essentiellement en fonction de la présence de l'outarde canepetière (Inchausti and Bretagnolle 2005), considérée à la fois comme espèce « parapluie » (son habitat est étendu donc sa préservation garantit la conservation de nombreuses autres espèces), « indicatrice » (sa présence atteste du bon fonctionnement du réseau trophique) et « porte-drapeau » (elle est emblématique des plaines céréalières de la région).

La ZPS Plaine de Niort Sud-Est est l'un des rares sites Natura 2000 à avoir été désignés en zone d'agriculture intensive. L'objectif de ce site est de mettre en place des actions de conservation de la biodiversité tout en maintenant une activité agricole. Le centre de recherche en écologie que nous présentons ci-après s'est investi en ce sens à travers ses activités de recherche, de sensibilisation et de conception de mesures de conservation.

⁶³ La plaine de la Crau est un ancien delta de la Durance (qui se jetait directement dans la Méditerranée au Quaternaire) dans le département des Bouches-du-Rhône. Elle constitue le dernier habitat de type steppique d'Europe occidentale.

⁶⁴ Document d'objectifs de la Zone de Protection Spéciale de la Plaine de NIORT Sud-Est (site NATURA 2000 FR 54 12 007) (2007), Groupe Ornithologique des Deux-Sèvres

3. Le système d'acteurs et son projet

a. Un acteur scientifique : le Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC)

Le Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC) est un laboratoire du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) situé dans les Deux-Sèvres, au sud-est de Niort. Il regroupe une quinzaine de chercheurs, une vingtaine d'ingénieurs et techniciens, et une trentaine de doctorants et post-doctorants, répartis en trois équipes de recherche. Dans le cadre de la thèse, nous avons travaillé en collaboration avec l'équipe « Agripop », et plus particulièrement avec son directeur, Vincent Bretagnolle.

L'équipe Agripop⁶⁵ étudie les mécanismes par lesquels les variations de l'environnement affectent la démographie et la distribution de divers prédateurs et herbivores. Les impacts humains, notamment ceux de l'agriculture, sont considérés dans les variations environnementales. L'objectif est en particulier d'analyser les conséquences de l'intensification de l'agriculture sur la biodiversité dans les agro-écosystèmes céréaliers. Les écologues cherchent à comprendre les processus écologiques et anthropiques qui régulent les populations animales. Ils s'intéressent en particulier à l'impact de l'abondance et de la distribution des ressources alimentaires sur les dynamiques spatiales et temporelles des populations. A l'échelle plus globale des communautés, sont étudiées les relations trophiques entre proies et prédateurs ou la dynamique des communautés d'espèces. Par exemple, des projets portent sur les déterminants paysagers de la structure des communautés de criquets et de carabes et les conséquences de cette structure pour leurs prédateurs comme les outardes canepetières. Le cadre théorique des travaux de l'équipe Agripop repose sur l'écologie et la démographie, ainsi que sur les concepts de l'écologie comportementale et de l'écologie évolutive. Ces travaux s'appuient sur des approches spatiales, sur la modélisation et sur la simulation ; ils mobilisent aussi des méthodes empiriques basées sur de nombreuses données collectées sur le terrain grâce au dispositif de Zone Atelier (voir encadré). Les bases de données permettent de suivre des populations sur le long terme et de rechercher les mécanismes responsables de leur évolution.

⁶⁵ Source : <http://www.cebc.cnrs.fr/>

Les Zones Ateliers, un dispositif d'étude des écosystèmes à grande échelle et sur le long terme

Depuis plus de 20 ans, le CNRS a mis en place des Zones Ateliers dans le cadre du programme « Environnement, Vie et Société ». Il en existe 12 aujourd'hui en France. Ce dispositif permet de prendre en compte l'évolution d'écosystèmes influencés par l'homme dans le temps long et à grande échelle spatiale. Les zones atelier sont des dispositifs de suivi et d'observation couvrant des territoires de grande ampleur, sur lesquels travaillent des équipes de recherche de disciplines variées (écologiques, agronomiques, sociales et économiques), d'approches contrastées (modélisation, analyse des données, enquêtes sociologiques et techniques) et d'institutions diverses.

La Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre⁶⁶, labellisée en 2008, a été mise en place par le Centre d'études biologiques de Chizé qui en assure la gestion. Sa superficie est de près de 500 km². Située sur la plaine de Niort-Sud-Est et une partie du Plateau Mellois, elle comprend environ 650 exploitations agricoles et 19 000 parcelles. Cette Zone Atelier permet le suivi de la biodiversité et des pratiques agricoles sur le long terme. Le laboratoire est doté d'une base de données spatialisée pour l'ensemble de la zone. Depuis 1994 l'assolement des 19 000 parcelles agricoles est relevé deux fois par an. De nombreuses espèces d'oiseaux de plaine (outarde, busard, œdicnèmes, passereaux,...) ainsi que leurs proies (insectes, micromammifères) sont quantifiées depuis cette même période. Des relevés floristiques existent depuis 2005. Par ailleurs, l'ensemble des campagnes photographiques IGN depuis 1952 est géo-référencé et ortho-rectifié, ainsi qu'un certain nombre de scènes satellites entre 1986 et 2002. Plus d'une centaine d'enquêtes sociotechniques ou économiques ont été réalisées depuis 2003 dans des exploitations afin de comprendre leur histoire, leurs pratiques actuelles et leurs possibilités d'évolution.

En parallèle des activités de recherche fondamentale, l'équipe Agripop intervient dans divers projets de conservation (programmes LIFE sur la protection de l'outarde canepetière par exemple) et dans l'animation du réseau Natura 2000 local. La Zone Atelier englobe la totalité de la Zone de Protection Spéciale Plaine et Val de Sèvre. Les écologues mènent également des activités de sensibilisation variées, que ce soit à travers des programmes déployés auprès des habitants du territoire tels que « Mon village espace de biodiversité », ou encore à travers de multiples interventions auprès des collectivités ou lors d'événements citoyens.

Dans le cadre de projets de conservation de l'outarde canepetière, le CEBC a identifié le fait que la luzerne était une production agricole particulièrement intéressante : elle est un site de reproduction d'insectes dont se nourrit l'outarde (en particulier ses juvéniles), et est un lieu de

⁶⁶ Source : <http://www.zaplainevaldesevre.fr/>

nidification pour cet oiseau. Nous explicitons par la suite les phénomènes conférant l'intérêt écologique de la luzerne, la façon dont les écologues les ont identifiés et les actions qu'ils ont mises en place pour développer cette production.

b. Un acteur agricole : la Coopérative Entente Agricole (CEA)

Présentation de la coopérative

CEA est une coopérative fondée en 1933. Son capital est détenu par 450 adhérents, sur lesquels 300 actifs contribuent au volume de collecte. Le territoire de collecte de CEA couvre 17000 ha sur le bassin Nord Charente-Maritime et le Sud Deux-Sèvres. Son siège social est situé à Lozay (17). La coopérative possède 6 sites de collecte, dont 3 sites principaux avec un magasin d'approvisionnement. La coopérative comprend 25 salariés, effectue en moyenne 110 000 tonnes de collecte et réalise entre 30 et 35 millions d'euros de chiffre d'affaires (dont 1/3 est lié à l'approvisionnement des exploitants en semences, produits phytosanitaires, fertilisants, etc., et 2/3 à la vente des produits agricoles collectés). Elle a mis en place des contrats de filière pour 11 productions dont les débouchés locaux constituent 70% des volumes, afin de pouvoir mieux tracer le devenir des productions et de sécuriser les débouchés ; le reste des produits collectés est exporté en vrac par le port de la Pallice (La Rochelle). Environ 35% des exploitations adhérentes sont en polyculture-élevage, avec essentiellement des vaches ou des chèvres laitières. Historiquement la coopérative était spécialisée dans la collecte de céréales et l'approvisionnement pour les grandes cultures ; plus récemment elle a élargi son panel d'activités dans les productions animales et les métiers spécialisés que sont l'horticulture, le maraîchage et les espaces verts.

La coopérative dispose d'une équipe de 6 conseillers productions végétales et 2 conseillers productions animales animés par un responsable de productions⁶⁷. Cette équipe propose aux adhérents des services tels que le conseil technique personnalisé (plans de fumure et suivi des cultures), l'aide à la réalisation des dossiers PAC et de la veille réglementaire, des outils d'analyse (analyses de sols, lisiers, fourrages, eau, test de germination...) et d'aide à la décision, une note d'information technique régulière, des essais locaux de variétés, ainsi que des opérations de collecte des déchets agricoles (emballages, bâches, ficelle, pneus...). Un responsable commercial propose également du conseil personnalisé aux agriculteurs pour la vente de leurs produits. La coopérative a mis en place récemment plusieurs démarches de certification : ISO 9001 et charte de sécurité alimentaire sur les activités de collecte et d'approvisionnement, et « Services et Conseils agricoles » sur la préconisation et la réglementation phytosanitaires ainsi que le suivi

⁶⁷ Voir organigramme en Annexe 2

technique en productions animales, ce qui a permis à la coopérative de renforcer son organisation interne et sa relation aux clients.

Les motivations de la coopérative et l'origine du projet en partenariat avec le CEBC

Le projet a démarré lorsque la coopérative CEA est venue solliciter le CEBC pour l'aider à mettre en place un projet visant à promouvoir une agriculture plus respectueuse de l'environnement. Les écologues ont proposé la mise en œuvre d'une filière courte de luzerne, de façon à développer cette production. L'idée proposée par les écologues était de concevoir une filière à la fois efficace en terme de préservation de la biodiversité et de la qualité de l'eau, et rentable économiquement pour la coopérative et ses adhérents.

Les motivations ayant poussé la coopérative à entreprendre ce projet sont multiples. Il s'agit d'une coopérative de taille modeste, opérant sur un territoire qu'elle partage avec d'autres coopératives et négoces, dont quatre sont de taille importante. Les agriculteurs sont d'ailleurs souvent adhérents à plusieurs coopératives simultanément. Etant donné le mouvement actuel de concentration des coopératives, l'indépendance de CEA est régulièrement menacée. La coopérative CEA tente donc de mettre en avant les avantages de son organisation « à taille humaine », proche de ses adhérents et soucieuse de son territoire.

Le Conseil d'administration de CEA a décidé en 2005 de développer des solutions innovantes en faveur de l'environnement, et de renforcer les contrats de filière et la gestion des débouchés à l'échelle du territoire. Cette décision a été prise dans un contexte général de conditionnement des aides de la PAC à l'environnement, du renforcement des réglementations et de l'attente sociétale dans ce domaine, d'une hausse de la volatilité des marchés et d'une baisse continue du nombre d'exploitants agricoles. Les motivations de la coopérative sont aussi liées à son territoire et à ses spécificités : elle déploie ses activités sur une zone particulièrement sensible sur le plan environnemental (présence de zones Natura 2000 et d'Aires d'Alimentation de Captage Grennelle). La coopérative voudrait favoriser le maintien de l'élevage dans le territoire et contribuer à mieux gérer les questions de gestion des effluents d'élevage et de fertilité des sols cultivés. Elle cherche aussi à mettre en place des solutions pour compenser la baisse attendue de son chiffre d'affaires. Celle-ci est liée à la diminution des surfaces en maïs due aux déficits hydriques, à la baisse de la marge d'approvisionnement anticipée avec la mise en place du plan Ecophyto 2018 (qui vise à diviser par deux l'utilisation de produits phytosanitaires au niveau national), mais aussi à la crise économique.

Dans ce cadre, la coopérative a d'abord réfléchi à différents projets visant à apporter plus de sécurité à ses adhérents et à les aider à mieux anticiper les changements attendus vers des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement, portant sur la réduction des intrants, la norme HVE (Haute Valeur Environnementale) ou encore bilan énergétique des exploitations... (Source : Projet CEA⁶⁸). Puis la coopérative a lancé simultanément fin 2010 trois projets en faveur de l'environnement, par lesquels elle cherche à devenir, à son échelle, le moteur de changements de pratiques agricoles. Cependant, n'ayant pas de compétences particulières dans le domaine de l'environnement, elle s'est rapprochée de différents experts de la région. Le premier projet vise à développer la méthanisation, de manière à produire de l'énergie à partir d'effluents d'élevage et à limiter les pollutions dues à un épandage trop concentré. La coopérative a sollicité un bureau d'étude spécialiste de la question. Le deuxième projet expérimente des pratiques d'agriculture de conservation (utilisation de couverts végétaux et non labour) en partenariat avec l'IAD (Institut de l'Agriculture Durable), de manière à mettre en place de nouvelles pratiques agricoles limitant le recours à l'irrigation, améliorant la qualité des sols et ayant des effets bénéfiques pour la biodiversité. La coopérative a également mis en place dans ce cadre des groupes de réflexion réunissant plusieurs agriculteurs et procédant à des expérimentations, par exemple sur les couverts végétaux ou les cultures intermédiaires. Le troisième projet est plus ciblé sur la préservation de la biodiversité et de la qualité de l'eau. Il s'agit de celui que nous avons accompagné et étudié au cours de la thèse, la filière courte de luzerne.

c. Un projet territorial : donner une cohérence agro-environnementale à une superposition de territoires

La Zone Atelier Plaine et Val de Sèvres a été délimitée de manière à couvrir la plaine céréalière du sud-est de Niort sur environ 500 km² ; elle comprend l'ensemble de la ZPS Plaine de Niort Sud-Est (voir Figure 17). Le CEBC est gestionnaire de la Zone Atelier, mais aussi opérateur pour les mesures agro-environnementales. Par conséquent, non seulement il mène des activités de sensibilisation et de diffusion des connaissances sur ce territoire, mais aussi il élabore, anime et instruit les contrats avec les agriculteurs pour promouvoir des pratiques favorables à la biodiversité, l'eau ou l'agriculture biologique. Le CEBC dispose en effet chaque année d'une enveloppe financière permettant de mettre en œuvre l'animation de ces contrats.

L'emprise du territoire de collecte de la coopérative CEA englobe la Zone Atelier et est environ quatre fois plus étendue. Le territoire de collecte correspond à l'ensemble des parcelles des agriculteurs adhérents. Cependant étant donné qu'une partie seulement des exploitations du

⁶⁸ Comment faire évoluer les pratiques agricoles pour répondre aux défis 2013 – 2018 ? Produire sans polluer - Gérer la ressource eau - Sécuriser les revenus. Projet CEA, IAD – Dec. 2011

territoire sont adhérentes à la coopérative, il est en réalité très morcelé. Sur la Figure 17 n'apparaît que l'emprise globale de ce territoire et non le détail des parcelles. La coopérative, à travers le conseil technique dispensé à ses adhérents et la vérification de la conformité aux contrats de filière, a une certaine influence sur les pratiques agricoles réalisées sur son territoire de collecte : par exemple, elle fournit des intrants aux agriculteurs et peut les inciter à mettre en place certains itinéraires techniques plutôt que d'autres.

Une troisième délimitation de territoire, encore différente, peut être mentionnée ici, celle des aires d'alimentation de captage (AAC) d'eau potable. Deux AAC sont présentes sur la zone d'étude et sont classées comme prioritaires dans le cadre du Grenelle de l'environnement : le bassin du Vivier et le bassin de la Courance. Les deux syndicats producteurs d'eau potable, le SMEPDEP de la Vallée de la Courance (Syndicat Mixte d'Etudes, de Production et de Distribution d'Eau Potable) et le SEV (Syndicat des Eaux du Vivier) mettent en place différentes actions d'animation et de gestion, notamment à travers des contractualisations de MAET (sur les zones bleues et vertes de la Figure 17).

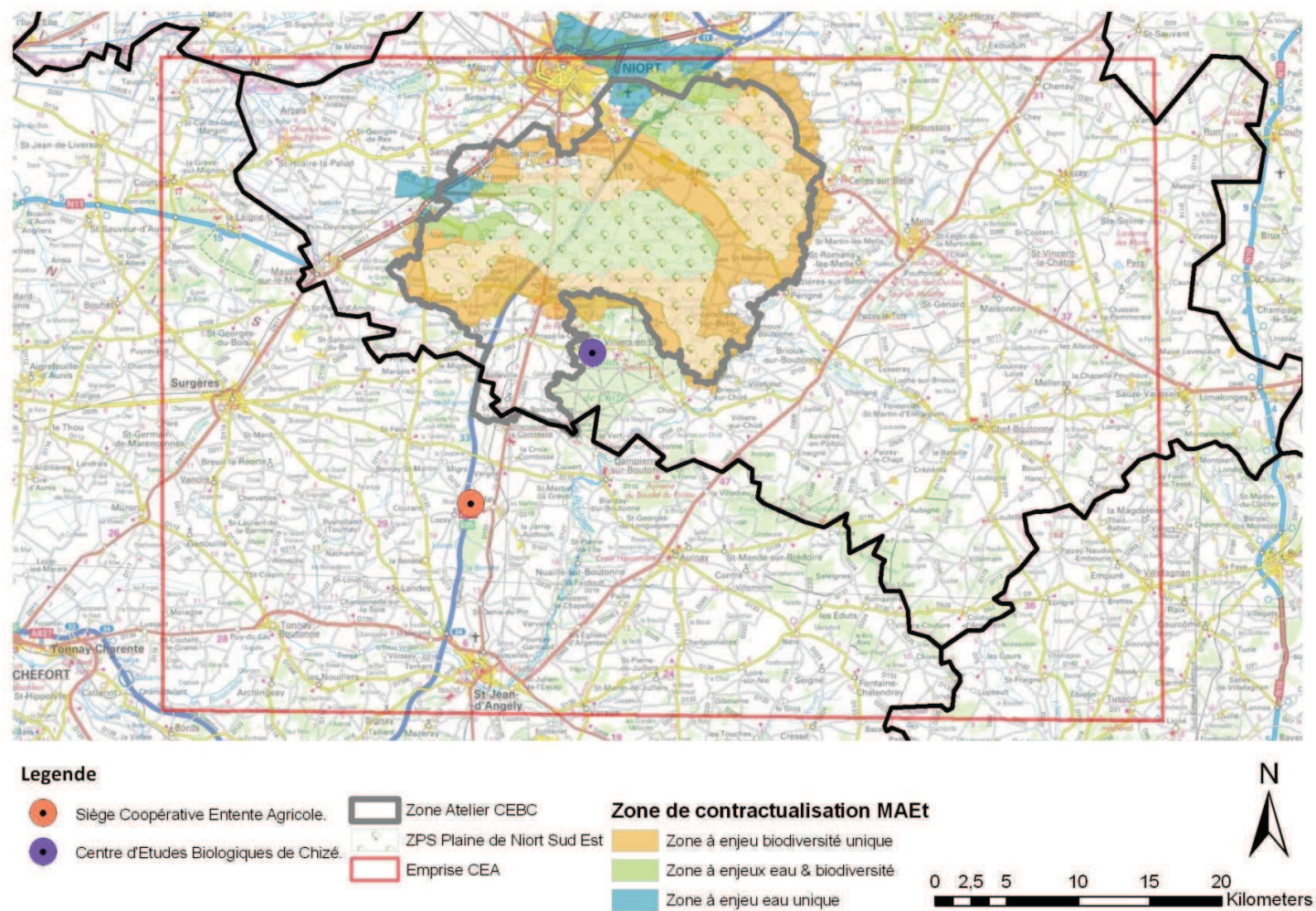


Figure 17 : Carte représentant la superposition des territoires pris en compte dans l'étude de cas : ZPS Plaine de Niort Sud-Est, Zone Atelier, différentes zones de contractualisation MAET et zone de collecte de la coopérative (emprise CEA) (Source : CEBC)

La rencontre entre la coopérative CEA et le Centre d'Etudes Biologiques de Chizé donnant lieu à la mise en place du projet de filière courte de luzerne a eu lieu au démarrage de la thèse. Nous avons décidé d'accompagner ce projet par une recherche-intervention dont nous allons à présent exposer la méthodologie. Notre objectif est de faire dialoguer ce cas empirique avec notre analyse théorique, en soulignant l'intérêt d'aborder les agro-écosystèmes sous l'angle de la conception, mais aussi les difficultés qu'une telle approche peut soulever en pratique.

Chapitre II. Une méthodologie pour accompagner les acteurs dans une démarche de conception d'un agro-écosystème

1. Une recherche-intervention : objectif et justification

En premier lieu, il nous semble utile de préciser que le positionnement dans le projet de filière luzerne des écologues du CEBC d'une part et de l'auteur de la thèse d'autre part, est sensiblement différent : les écologues sont impliqués dans une démarche de recherche-action (Lewin 1951) dont on peut dire qu'ils respectent les cinq grands principes (Argyris *et al.* 1985; David 2002) :

- ils mènent une expérimentation « hors du laboratoire », c'est-à-dire qu'ils contribuent à initier et analyser un changement dans le monde réel
- ils sont globalement dans une démarche itérative d'identification, planification, action et évaluation du projet : eux-mêmes disent être dans une démarche de « management adaptatif »
- ils contribuent à initier un changement dans un système social, influencent les décisions des acteurs (ici la coopérative, les agriculteurs, les collectivités...)
- ils cherchent à faire évoluer le statu quo de manière démocratique, en favorisant la participation et l'information d'acteurs divers
- ils cherchent à produire des connaissances pour l'action.

Toutefois, en tant qu'écologues, ils ne disposent pas suffisamment de méthodes et outils pour suivre les transformations du système social étudié. Ainsi, pour tenir cette posture de recherche-action (en parallèle de leurs travaux plus fondamentaux en écologie) ils se sont associés à différents chercheurs en sciences sociales, notamment au laboratoire de sociologie de l'Université d'Aberdeen (UK), pour mieux comprendre les obstacles au transfert de connaissances entre chercheurs en écologie et praticiens du secteur agricole. Dans le cadre du projet de filière luzerne

avec la coopérative CEA, les écologues du CEBC nous ont proposé de suivre la mise en place du projet, et d'en tirer des connaissances permettant de mieux comprendre le résultat des initiatives mises en place et les difficultés rencontrées, de manière à pouvoir éventuellement reconduire l'expérience dans d'autres situations.

Ainsi la posture que nous avons adoptée dans la thèse n'est non pas celle d'une recherche-action, dans laquelle nous aurions contribué à concevoir l'expérimentation, mais plutôt une posture combinant la recherche-intervention et l'observation participante. C'est ce que nous allons à présent expliciter et justifier.

Selon David (2002), « la recherche-intervention consiste à aider à concevoir et à mettre en œuvre sur le terrain des modèles de gestion, des outils et des procédures adaptés, sur la base d'un projet de transformation plus ou moins défini, dans le but de produire à la fois des connaissances pour l'action, et des théories plus ou moins générales en sciences de gestion » (notre traduction). Cette posture de recherche-intervention nous a semblée adaptée au cas étudié dans la mesure où elle permet d'analyser et d'accompagner la mise en place d'innovations managériales nécessaires à une action collective. Mais contrairement à une situation de recherche-action, ce sont les acteurs de terrain et non le chercheur-intervenant qui identifient le besoin de transformation et qui l'initient. Dans le cas empirique étudié, ce sont les écologues et la coopérative CEA qui ont initié le projet ; nous n'avons pas adopté dans le cadre de la thèse de posture prescriptive. Ce point était capital pour clarifier notre positionnement par rapport aux acteurs du projet.

La recherche-intervention permet de comprendre en profondeur le fonctionnement d'un système, d'accompagner les acteurs à mieux formuler les problèmes qu'ils rencontrent et de définir des trajectoires possibles d'évolution. Elle consiste ensuite à aider les acteurs à faire le choix d'une trajectoire, à la réaliser et à en évaluer le résultat (David 2002). L'idée est de coproduire des connaissances avec les acteurs, « de l'intérieur ». Ainsi, comme nous avons pu suivre ce projet à la fois pionnier et exploratoire dès son lancement, il nous a semblé plus adapté d'adopter cette posture plutôt que de mener seulement une démarche d'observation. Toutefois, comme le soulignent (Hatchuel and David 2007), la recherche-intervention implique une alternance entre observation participante, modélisation du cas, restitution des résultats de l'analyse et dialogue avec les acteurs, ce que nous nous sommes attachés à faire.

Notre recherche-intervention s'est donné les objectifs suivants :

- Dénaturaliser les catégories préconçues les objets et les points de vue des différents acteurs pour favoriser les apprentissages. Ce point était d'autant plus important que le partenariat entre les deux acteurs était inédit.
- Elaborer un diagnostic des tensions entre acteurs du secteur agricole et acteurs de la conservation ; nous avons notamment contribué à plusieurs reprises à expliciter le point de vue et le raisonnement des écologues, de manière à rendre leurs propositions plus compréhensibles par les acteurs du secteur agricole.
- Participer au montage du projet de filière luzerne territoriale et écologique, non pas en suggérant des solutions « toutes faites », mais en proposant une reformulation des problèmes rencontrés, en explorant diverses voies possibles et en identifiant des pistes à approfondir pour favoriser les capacités locales d'innovation collective et la coopération. Nous avons dans ce cadre contribué au montage d'un projet de recherche-action associant le CEBC, CEA, des syndicats d'eau, différentes équipes de l'INRA, et financé par des collectivités locales. Mais ce sont les acteurs, en particulier la coopérative, qui ont pris les décisions liées à la mise en œuvre du projet de filière.
- Proposer des outils et méthodes de gestion pour soutenir la mise en place et la pérennisation du projet. Cet objectif n'a pas été totalement atteint. Ceci peut s'expliquer par notre intérêt prioritaire, dans le cadre de la thèse, pour la manière dont les acteurs pouvaient se représenter l'agro-écosystème en vue d'en envisager la gestion commune, avant la mise en œuvre effective de la filière. Notre réflexion a donc davantage consisté en une modélisation théorique de la situation qu'en la formulation de propositions d'ordre opérationnel.
- Enfin, discuter la pertinence et les limites des approches par les services écosystémiques ou par la gestion des biens communs.

2. Méthodologie pour collecter les données et accompagner le processus de conception

Notre travail de recherche-intervention s'est déroulé sur le temps long, d'avril 2010 à avril 2013, dans la perspective d'une recherche « longitudinale » telle qu'a pu la définir (Pettigrew 1990) : le contact avec le terrain s'est étalé sur environ trois ans, et les interactions avec les parties prenantes du projet n'ont cessé du début à la fin de la thèse (voir Figure 18).

a. Analyse rétrospective du travail de recherche-action des écologues

Préalablement à l'accompagnement de la mise en place du projet de CEA et du CEBC, nous avons réalisé dans le cadre d'un mémoire de Master recherche en sciences de gestion une analyse rétrospective des actions de conservation menées dans la plaine de Niort Sud-Est par le CEBC (Berthet 2010; Berthet *et al.* 2012b). Notre objectif était de reconstituer, a posteriori, les différentes étapes concernant la mise en place d'actions de conservation initialement ciblées sur l'outarde canepetière, ainsi que le raisonnement de conception sous-jacent. Nous avons alors adopté une posture d'observation indirecte et ex-post des actions mises en place et des raisonnements tenus. Nous rappellerons les principaux résultats de cette recherche que nous avons ensuite mobilisée dans le cadre de la thèse.

La méthodologie utilisée pour l'analyse rétrospective du raisonnement de conception des écologues est explicitée dans le mémoire de Master de 2010 ; nous en reprenons ici les principaux aspects. Nous avons croisé une analyse bibliographique et documentaire avec la réalisation d'entretiens auprès d'acteurs impliqués dans ces actions de conservation. La revue de littérature a couvert trois catégories de documents écrits : (i) des articles scientifiques portant sur Natura 2000, la biologie de la conservation, les services écosystémiques et les théories de la conception ; (ii) des projets de recherche et rapports scientifiques du CEBC publiés ou non ; (iii) des textes d'ordre administratif, réglementaire ou législatif concernant les Directives Oiseaux et Habitats et Natura 2000.

Nous avons réalisé 23 entretiens entre mai et août 2010 avec :

- des chercheurs en écologie du CEBC et des chercheurs en sciences sociales de l'INRA, de l'ENGREF et de l'Université de Nanterre
- des acteurs impliqués dans la mise en œuvre de Natura 2000 et de la gestion du territoire : représentants du Ministère de l'environnement (MEEDDM), des services déconcentrés de l'Etat, d'associations environnementales et de collectivités territoriales locales
- des agriculteurs et organismes liés à la profession agricole.

Les entretiens ont été menés de façon semi-directive avec des questions ouvertes. Ils visaient à comprendre le processus de mise en œuvre de Natura 2000 dans la région : la généalogie des actions, les obstacles rencontrés et les solutions imaginées. Un autre objectif était d'identifier le système d'acteurs impliqués dans la désignation et la gestion du site Natura 2000 correspondant au cas d'étude. Enfin une partie des entretiens a servi à reconstituer le raisonnement de conception des actions de conservation de l'outarde canepetière, principale espèce patrimoniale

visée par la mise en place de sites Natura 2000 dans les plaines céréalières de la région. Nous avons réalisé une cartographie de ce raisonnement essentiellement mené par les écologues du CEBC à l'aide du formalisme de la théorie C-K. Nous en présentons un extrait ci-après (Figure 19). Cette cartographie a été construite de façon itérative, sur la base des entretiens ainsi que de la revue documentaire et bibliographique, en étant confrontée à plusieurs reprises aux avis des personnes impliquées dans le raisonnement.

b. La recherche-intervention pour accompagner la mise en place du projet de filière luzerne

Dans le cadre de la thèse, nous avons mis en œuvre les trois principes méthodologiques de la recherche-intervention (David 2002):

1. Le **principe de l'enquête exploratoire**, qui signifie que la recherche doit être menée en gardant à l'esprit l'objectif de concevoir ou de soutenir des projets de transformation et de proposer des trajectoires collectives possibles pour le système étudié, et non pas simplement de fournir une analyse statique.

Dans le cadre de la recherche-intervention, nous avons tout d'abord réalisé une phase exploratoire d'entretiens visant à cerner les enjeux d'innovation liés au projet : 18 entretiens ont été menés en janvier et février 2011 auprès de différents acteurs de la coopérative (administrateurs, directeur, techniciens et agriculteurs adhérents), de chercheurs ainsi que de représentants de collectivités locales et de chambre d'agriculture. Les objectifs étaient d'une part de mieux connaître la coopérative CEA (son histoire, son organisation et son fonctionnement) et le contexte agricole, et d'autre part de mieux connaître les modalités et contraintes de production de la luzerne et les types de débouchés possibles. Enfin un troisième objectif était de recenser les propositions, avis et attentes des acteurs concernés par le projet de filière luzerne, afin de commencer à faire apparaître différentes voies possibles pour le projet. Ces entretiens ont donné lieu à une première modélisation de la situation restituée devant le groupe de travail du projet en mars 2011.

2. Le **principe de conception**, qui implique que le chercheur quitte rapidement l'étape des entretiens, pour passer à la phase d'intervention en tant que telle, c'est à dire la conception et la mise en œuvre des outils de gestion et d'organisation qui sont les plus appropriées au problème de gestion identifié.

La mise en place d'un projet de filière courte de luzerne à la fois économiquement rentable, socialement acceptable et écologiquement efficace, nécessitait un processus de conception

permettant de concilier des objectifs *a priori* antagonistes, et de tenir compte de difficultés jusqu'alors non surmontées. Il nécessitait notamment d'innover sur le plan de la gouvernance et des outils de gestion. Les initiateurs du projet (le président et le directeur de CEA) sont dits prêts à étudier différents leviers possibles pour la mise en place de la filière : conseil, nouveaux types de contrats, mais aussi réalisation d'expérimentations chez un réseau d'exploitants... Ils ont mis en place un comité restreint de suivi du projet, constitué de différentes personnes de la coopérative CEA, le Président, le Directeur, trois administrateurs et un technicien agro-environnemental, mais aussi du Directeur du CEBC, et de l'auteur de la thèse.

Toutefois suite aux entretiens, il nous a semblé que la coopérative partait dans une voie classique pour le montage de la filière, sans intégrer l'ensemble des contraintes (et atouts possibles) liés à la mise en place d'une filière au triple objectif de durabilité : social, économique et environnemental. En effet, la première initiative de la coopérative a été d'élaborer un contrat tripartite entre la coopérative, un céréalier et un éleveur, de manière à centraliser les échanges et à garantir des prix stables aux producteurs de luzernes comme aux acheteurs. Elle proposait dans le contrat un cahier des charges classique avec utilisation d'intrants chimiques, sans pilotage de la localisation des prairies. Or si cette voie privilégiait les objectifs de production et de qualité du fourrage, elle n'était pas favorable à un certain nombre d'objectifs environnementaux tels que le maintien des populations de criquets ou la préservation de la qualité de l'eau.

Pour ces raisons nous avons proposé aux parties prenantes du projet de mener au préalable de la mise en œuvre de la filière une phase d'exploration des voies possibles pour le projet avant de prendre des décisions. Nous avons travaillé sur quatre axes: les formes de valorisation possibles de la luzerne, les processus écologiques favorisés par la mise en place de luzerne dans la plaine céréalière, les paramètres de gestion à activer selon les types d'objectifs poursuivis (synergies et antagonismes) et enfin le positionnement de la coopérative. Nous avons proposé d'organiser un atelier de conception collective, dont l'objectif était de contribuer à mieux définir les contours du projet et de faire émerger de nouvelles propositions ou alternatives les plus originales possibles, pour éviter les effets de fixation (Smith *et al.* 1995). Ces derniers sont un biais cognitif lié à une activation spontanée de connaissances relatives aux solutions « classiques » du problème donné qui contraint l'exploration de solutions alternatives (Agogué 2012). Il ne s'agissait pas de réaliser une étude de faisabilité d'un projet prédéfini, ni de conduire un exercice de créativité de type brainstorming, mais de mener une réflexion collective organisée basée sur l'exploration de concepts innovants. L'ambition était de faire émerger des solutions nouvelles et de proposer des critères de performance sur lesquels se mettre d'accord.

L'atelier a été réalisé d'après la méthode KCP (Knowledge-Concept-Proposition) (Elmqvist and Segrestin 2009; Hatchuel *et al.* 2009a; Hatchuel *et al.* 2009b; Arnoux 2013) développée par les chercheurs du Centre de gestion scientifique à Mines ParisTech. La méthode KCP est tirée de la théorie C-K. Elle vise à surmonter les contraintes rencontrées par les entreprises cherchant à générer des innovations de rupture, qui sont essentiellement de deux ordres : cognitif (comment faire émerger des idées nouvelles, des concepts et des connaissances permettant d'innover malgré les effets de fixation d'autant plus courants que les collectifs sont grands ?), et organisationnel (comment organiser et gérer les concepts en rupture sans que les changements ne menacent la cohésion du collectif ?) (Agogué *et al.* 2013).

La méthode KCP a été développée initialement pour stimuler des processus de conception innovante au sein de grandes entreprises industrielles, c'est-à-dire au sein d'organisations clairement définies, hiérarchiques, pour lesquelles il est facile d'identifier les responsables de la gestion stratégique de l'organisation. Elle est généralement déployée sur plusieurs mois, avec pour chaque phase l'organisation de plusieurs ateliers. La thèse a contribué à appliquer pour la première fois cette méthode dans le secteur agricole, dans lequel les acteurs sont dispersés au sein d'organisations hétérogènes (publiques, privées, individuelles, collectives...), ce qui par conséquent peut rendre leur mobilisation plus difficile sur le long terme. Etant donné ce contexte, nous avons choisi de n'organiser qu'un atelier très court, sur une journée, lors de laquelle seules les phases K et C ont été réalisées.

La méthode KCP comporte trois phases permettant d'aider un collectif à explorer et structurer un champ d'innovation. Nous en avons respecté la structure bien que les deux premières phases aient été considérablement raccourcies et allégées pour faire tenir l'atelier en une journée.

- **La phase K (« état de l'art et du non art »)** vise à partager les connaissances détenues par les parties prenantes du projet mais aussi des experts externes. Elle permet d'identifier également les pistes en rupture et les connaissances manquantes, de manière à préparer l'émergence de concepts novateurs. Lors de l'atelier, des éclairages variés sur le champ d'exploration concernant la filière luzerne ont été proposés par des experts de domaines divers comme la biodiversité, l'agronomie, l'économie ou l'hydrologie.
- **La phase C (développement de « concepts-projecteurs »)** vise à organiser une démarche de créativité « dirigée » selon des règles précises ; elle se distingue en cela des méthodes de créativité du type brainstorming. Lors de l'atelier, le collectif a été séparé en quatre groupes qui devaient travailler à partir de « concepts-projecteurs »

visant à stimuler des explorations inattendues : la luzerne « haut de gamme », la luzerne « qu'on aime cultiver », la luzerne « qui nous distingue », la luzerne « front de recherche » (voir Annexe 4.b). Pour chaque concept-projecteur, les participants devaient renseigner un certain nombre d'informations concernant les fonctions attendues du type de luzerne proposé (objectifs et critères de performance), les moyens possibles ou à développer pour les atteindre, le modèle économique adapté, ainsi que le rôle pour la coopérative et pour les autres acteurs impliqués, et enfin les obstacles à surmonter.

- **La phase P (proposition d'une stratégie de conception innovante)** visait à agréger et recombinaison les propositions originales des phases K et C, à identifier les voies prometteuses en termes de conduite du projet et à mettre en place une stratégie d'innovation sur le long terme pour les parties prenantes du projet.

Cet atelier de conception innovante a eu lieu le 18 mai 2011. Il a permis de réunir une trentaine d'acteurs⁶⁹ : agriculteurs, techniciens agricoles, membres du conseil d'administration et de la direction de la coopérative, représentants de collectivités locales et d'organismes de développement agricole, chercheurs en écologie, agronomie et sciences sociales. Si la majorité des participants étaient de la coopérative, l'atelier a tout de même été l'occasion de réunir des parties prenantes qui ne se connaissaient pas auparavant. L'atelier a nécessité une phase de préparation durant les deux mois qui l'ont précédé. La phase P a été menée durant le mois de juin 2011.

En plus de cet atelier, nous avons suivi le montage et la mise en place du projet en adoptant une posture d'observation participante. Nous avons assisté à une quinzaine de réunions quasi-mensuelles entre les acteurs du projet de décembre 2010 à avril 2013. Pour certaines, nous proposons une restitution de notre analyse aux acteurs de manière à éclairer leurs décisions ou favoriser leur réflexivité sur le projet. Nous sommes intervenus en modélisant la situation et en proposant un ensemble de pistes possibles plutôt qu'en indiquant une voie à suivre, et ce, de manière à favoriser la collaboration entre des acteurs qui initialement ne travaillaient pas ensemble, ne se comprenaient pas voire étaient plutôt en désaccord pour concevoir une filière luzerne capable d'atteindre une multiplicité d'objectifs. Nous avons également participé à deux réunions d'information sur le projet auprès des agriculteurs du territoire, chaque réunion comptant 30 à 40 participants.

⁶⁹ Voir liste des participants et détails sur l'organisation de la journée en Annexe 4

Nous avons par ailleurs contribué à l'élaboration d'un projet de recherche-action réunissant des équipes du CEBC, de l'INRA de Lusignan, de l'INRA de Paris-Versailles et d'Agroparistech, ainsi que les membres de la coopérative. Nous avons suivi son montage financier avec différentes collectivités locales (Région Poitou-Charentes, Conseils Généraux de Deux-Sèvres et de Charente-Maritime, et Agences de l'eau Loire-Bretagne et Adour-Garonne –à ce jour encore en attente) ainsi que la réalisation d'une étude de faisabilité du projet, mené par le bureau d'étude NCA.

3. Le **principe de la libre circulation entre les niveaux théoriques**, qui signifie que le chercheur travaille constamment sur la base d'un raisonnement par abduction réursive - déduction - induction (David 2000), reliant les faits observés avec les théories intermédiaires ou plus générales.

Une logique d'abduction nous permet de construire notre observation empirique à partir du point aveugle identifié dans la littérature sur la conception des agro-écosystèmes. L'analyse du cas mobilisant le cadre théorique de la conception nous permet de mettre en évidence le potentiel d'une approche par la conception pour surmonter un blocage de l'innovation lié à des divergences d'intérêts sur l'agro-écosystème, mais aussi les difficultés qu'une telle approche peut générer. Cette analyse empirique, confrontée à divers champs de littérature (biens communs, services écosystémiques, conception, modèle de Georgescu-Roegen), nous permet enfin de construire un modèle pour outiller la conception d'un agro-écosystème.

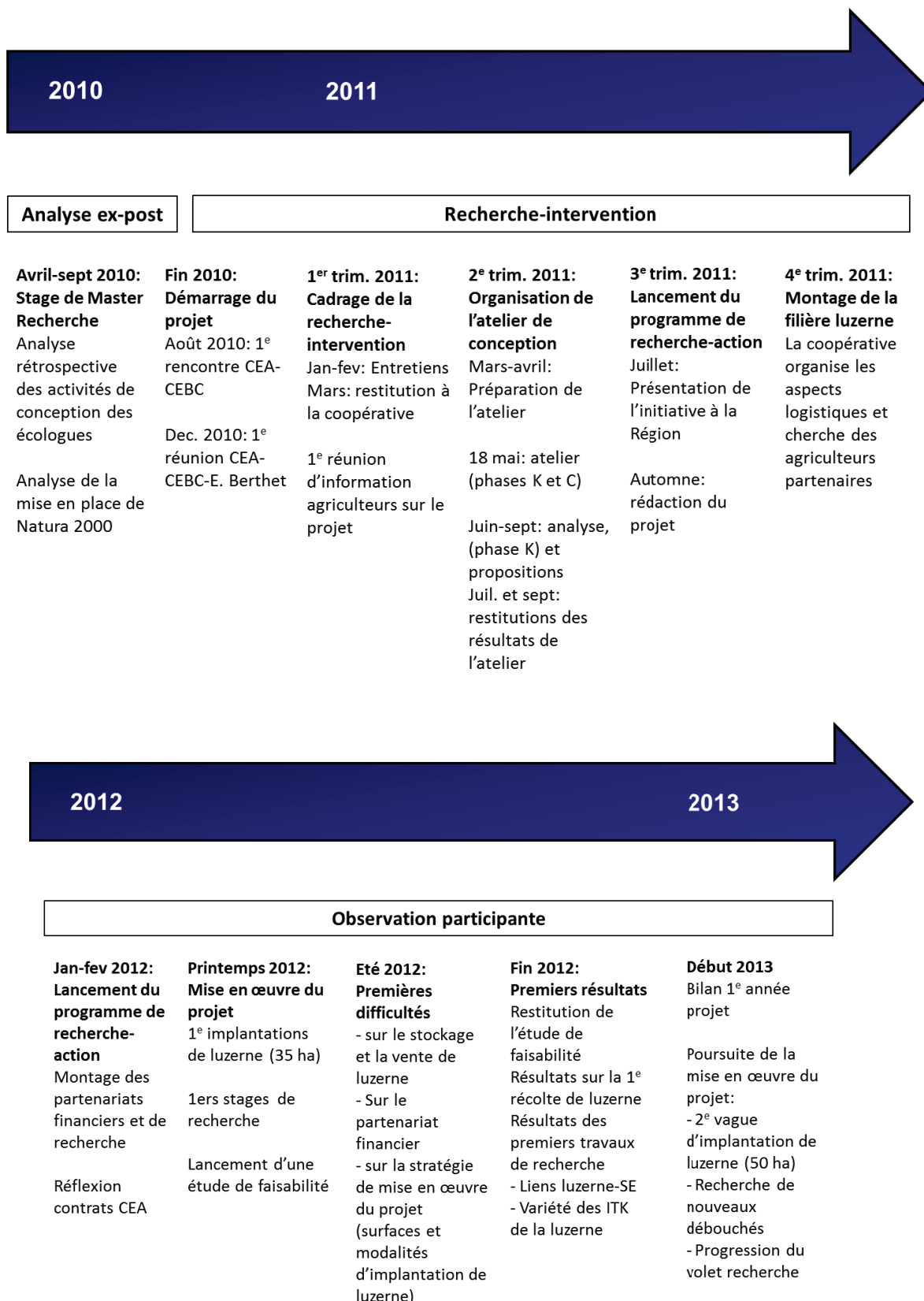


Figure 18 : Chronologie des principales étapes de l'étude de cas

Chapitre III. Débloquent un processus d'innovation par la conception d'un agro-écosystème

1. Concilier production agricole et conservation de la biodiversité : un projet d'internalisation économique d'un service écosystémique

Lorsque les ornithologues de la LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux), de l'ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage) et du CEBC (Centre d'Etudes Biologiques de Chizé) ont identifié le déclin de la population d'outardes, ils ont lancé un projet de recherche et de conservation de cette espèce⁷⁰. Ce projet a été lancé alors que les connaissances sur la biologie de l'outarde canepetière étaient très limitées, les mesures à mettre en œuvre pour sa conservation n'étaient pas connues, et de manière plus générale, les impacts des grandes cultures sur la biodiversité de plaine peu évalués. Près de quinze ans plus tard, 13 mesures agro-environnementales territoriales (MAET) ciblées sur la conservation de l'outarde et de la faune associée étaient proposées aux agriculteurs. En 2010, 3236 ha de MAET ont été contractualisés sur la Zone Atelier Plaine et Val de Sèvres. Suite à la mise en œuvre des dispositifs agro-environnementaux, le CEBC enregistre une augmentation du nombre de mâles d'outardes depuis 2004 (multiplié par 5 en 5 ans), alors que celui-ci était en diminution depuis 1995. D'après les écologues, la remontée des effectifs d'outardes est imputée principalement au recrutement local, c'est-à-dire la production de poussins issus des femelles dont les nids ont été protégés par les contrats ou les mesures de protection directe. Il est également possible que des individus se soient déplacés d'une zone extérieure vers la Zone de Protection Spéciale (ZPS), et que la réintroduction d'outardes dans le cadre du plan de renforcement des populations y ait contribué. En tout état de cause, ce succès est atypique par rapport à l'échec relatif de la mise en œuvre de la politique Natura 2000 (Kettunen *et al.* 2010) et des MAE (Kleijn *et al.* 2006). Il est aussi paradoxal puisque la ZPS est l'une des seules zones Natura 2000 située en zone d'agriculture intensive, les autres étant plutôt désignées dans des zones peu dégradées par les activités humaines. Nous avons donc cherché, par une analyse rétrospective des recherches menées et des solutions explorées par le CEBC, à comprendre le raisonnement qui a permis aux écologues d'ouvrir des voies nouvelles pour la conservation de l'outarde canepetière, et plus largement de la biodiversité dans la plaine céréalière.

⁷⁰ « Programme expérimental de sauvegarde de l'Outarde canepetière et de la faune associée en France » lancé en 1997. Programme LIFE soutenu par la Commission Européenne.

a. Reconstitution du raisonnement des écologues identifiant la luzerne comme solution au déclin de la biodiversité dans la plaine

Une production de connaissances scientifiques au service de la conception de mesures de conservation

Une voie classique de conservation aurait été de mettre en place une réserve naturelle dans la plaine et d'en exclure les activités agricoles. Cependant les intérêts économiques liés à la production agricole étaient en plein essor, et l'aire de répartition de l'outarde canepetière très étendue, si bien qu'il était impossible de retenir une telle solution. Par conséquent, en associant la recherche à l'action, les écologues ont initié un processus de conception dont le point de départ était de développer de nouvelles pratiques agricoles permettant de conserver l'outarde (et par conséquent d'autres espèces, puisqu'il s'agit d'une espèce clé de voûte). En d'autres termes, les écologues visaient à concevoir un agro-écosystème fournissant à la fois des produits agricoles et de la biodiversité, soit une multiplicité de services écosystémiques. Nous avons reformulé le concept initial (Hatchuel and Weil 2003) ainsi : « Concilier préservation de l'outarde et production agricole ».

La représentation par un arbre C-K de la conception des actions en faveur de l'outarde que nous présentons dans la Figure 19 ne retranscrit pas de façon exhaustive ni chronologique les étapes des raisonnements menés par les acteurs concernés sur les quinze dernières années ; elle vise à mettre en évidence quelques étapes-clés du raisonnement suivi. Elle est de plus ciblée plus particulièrement sur les raisons qui ont conduit les écologues à identifier la luzerne comme solution permettant de limiter le déclin de l'outarde dans la région.

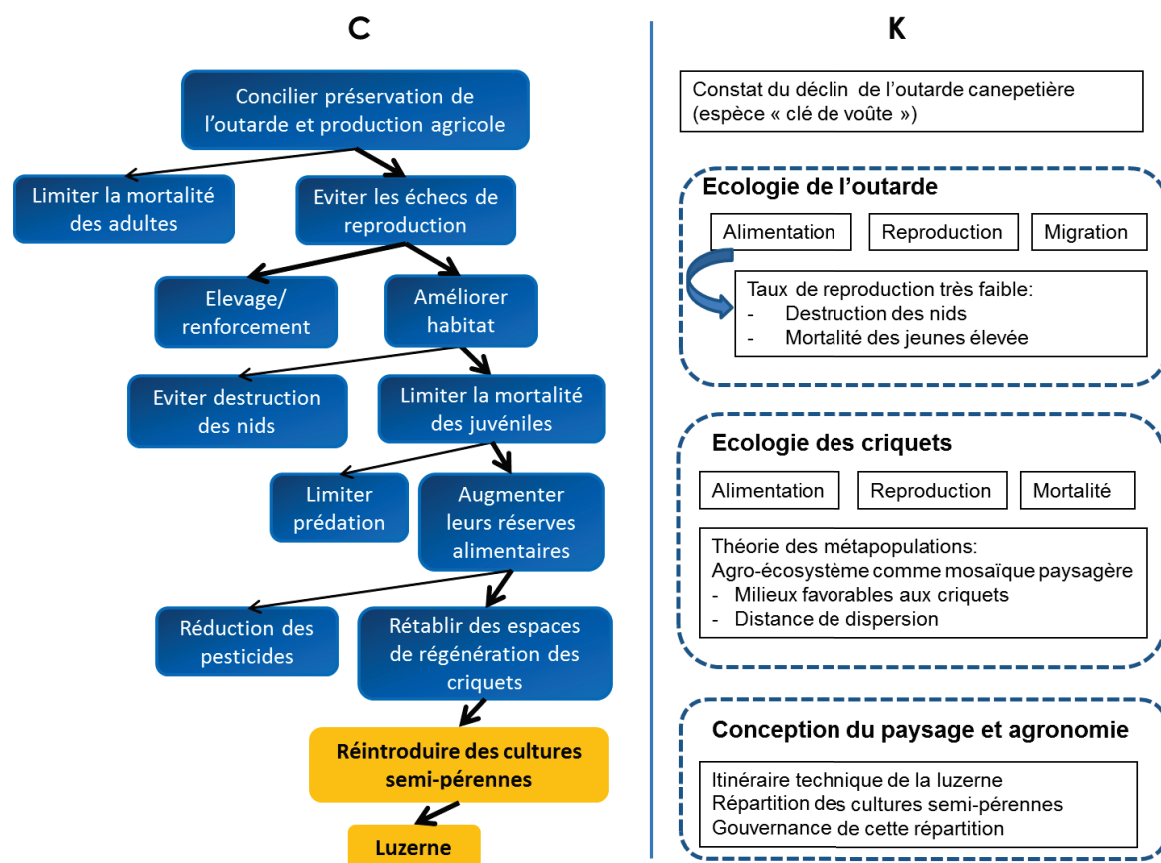


Figure 19 : Cartographie du raisonnement de conception des écologues aboutissant à la réintroduction de luzerne dans la plaine céréalière.

À gauche l'espace des concepts, à droite l'espace des connaissances. Les flèches en gras représentent les voies choisies en priorité par les écologues. Les cases jaunes indiquent qu'il ne s'agit plus de concepts mais de solutions concrètes.

Les écologues du CEBC ont d'abord cherché à comprendre les causes principales de la diminution de la population d'outardes dans la région. Le facteur identifié comme étant le plus significatif était la productivité des femelles (Bretagnolle and Inchausti 2005). Les écologues ont par conséquent cherché à éviter les échecs de reproduction. Compte tenu de la baisse rapide des effectifs d'outardes dans les zones agricoles, deux stratégies complémentaires ont été poursuivies: la reproduction en captivité, et l'amélioration de la qualité de l'habitat dans l'agro-écosystème. Les chercheurs ont constaté que la moitié des œufs n'arrivait pas au stade de l'éclosion, 40% de cette perte étant due à la destruction des nids par les pratiques agricoles (fauche des prairies surtout). Surtout, les écologues ont repéré que près de 40% des poussins ne survivaient pas plus de quelques semaines en raison d'un déficit alimentaire: en effet les poussins se nourrissent exclusivement d'insectes, en particulier de criquets. Or ces derniers, en raison des pratiques agricoles intensives, ont vu leurs effectifs grandement diminuer (Inchausti and Bretagnolle 2005).

Le déficit alimentaire des poussins a été identifié comme un obstacle majeur à la survie de l'outarde canepetière et a été ciblé en priorité par les écologues. Ils ont alors exploré différentes voies pour augmenter les populations de criquets dans la plaine. Pour cela, les écologues ont étudié de façon générale le fonctionnement écologique de l'agro-écosystème. La représentation de ce dernier n'était en effet plus seulement ciblée sur les propriétés conditionnant la survie et la reproduction de l'outarde. Les écologues ont identifié deux obstacles majeurs au développement des populations de criquets : l'application répétée d'herbicides et d'insecticides, et le labour qui détruit chaque année les lieux de ponte de ces insectes (Badenhausser *et al.* 2009). Ils en ont conclu que pour maintenir les populations de criquets il fallait d'une part réduire le régime de perturbation du milieu, (limiter voire interdire l'utilisation de pesticides), et d'autre part réintroduire des espaces offrant un habitat favorable à la reproduction des criquets et les distribuer de façon optimale dans l'espace (Bretagnolle *et al.* 2011). Les écologues ont exploré diverses options pour régénérer les populations de criquets: acheter des îlots de terres aux agriculteurs et en exclure la production agricole, accroître les surfaces en jachère ou encore développer la production de couverts végétaux semi-pérennes⁷¹, qu'ils qualifient de « prairies ». La propriété des prairies qui intéresse en priorité les écologues est le fait que ce soit un milieu moins perturbé que les cultures annuelles. Ce terme est à prendre dans un sens large : les écologues associent à la prairie une diversité de couverts végétaux, que ce soit des graminées ou des légumineuses, et ces prairies peuvent être temporaires ou permanentes.

Pour en arriver à cette voie « réintroduire des espaces offrant un habitat favorable à la reproduction des criquets et les distribuer de façon optimale dans l'espace », les écologues ont mobilisé la théorie des métapopulations (évoquée dans la Partie 1 de la thèse), qui prédit que l'extinction locale d'une population peut dans certaines conditions être compensée par la colonisation de l'espace par une autre population. Ce cadre théorique a permis aux chercheurs de changer leur représentation de l'agro-écosystème : d'une représentation implicitement homogène lorsqu'ils s'intéressaient essentiellement au réseau trophique de l'outarde, ils l'ont modélisé comme une mosaïque paysagère hétérogène. Cette mosaïque est composée d'espaces semi-naturels (habitat de haute qualité écologique) et de zones de cultures annuelles (habitat de faible qualité écologique). Une mosaïque paysagère est considérée comme étant de haute qualité écologique si elle permet un équilibre entre le taux de migration et le taux d'extinctions locales (Perfecto *et al.* 2009). Or le taux de migration des criquets dépend de la distance entre les patches qui leur sont favorables, ici les prairies (voir Figure 20).

⁷¹ Plante cultivée entre 2 et 5 ans.

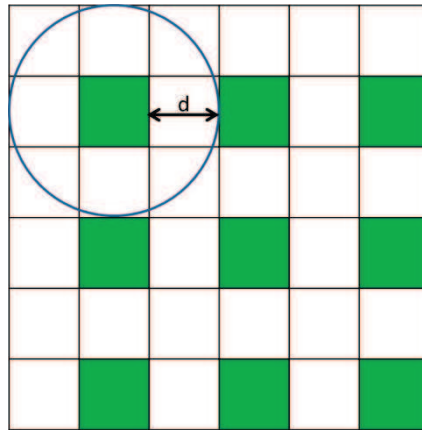


Figure 20 : Représentation schématique de la mosaïque paysagère.

La mosaïque est composée de prairies en vert et de cultures annuelles en blanc. Le cercle représente la capacité de recolonisation de criquets à partir d'une prairie.

Les prairies sont à la fois des refuges et des « sources » de criquets, c'est-à-dire des espaces propices à la reproduction de l'espèce. Si la distance de migration de l'espèce considérée est inférieure ou équivalente à celle séparant deux sources, alors les recolonisations pourront compenser les extinctions locales de criquets. La « distance entre les prairies » devient une variable-clé pour la conception d'une mosaïque paysagère favorable au maintien de la population de criquets. Sur la base de différentes observations empiriques et enseignements tirés de la littérature sur la distance de migration des criquets, les écologues ont fixé un objectif de 15% de surfaces en prairies dans la plaine de grandes cultures (avec une fourchette allant de 10 à 20%). Les prairies doivent être de préférence de taille moyenne (3-6 ha)⁷² et dispersées aléatoirement avec une distance minimale entre parcelles voisines de moins d'1 km.

L'option privilégiée par les écologues : l'augmentation des surfaces en luzerne

Etant donné que les prairies sont des espaces de production agricole (elles permettent de produire du fourrage pour le bétail), cette solution a été considérée par les écologues comme la moins onéreuse et la plus acceptable pour les agriculteurs. Parmi les cultures semi-pérennes ou « prairies » possibles, les écologues ont ciblé en priorité la luzerne (voir Annexe 1) pour différentes raisons, à la fois écologiques, agronomiques et économiques :

- Au plan écologique, la luzerne est particulièrement appréciée par certaines espèces de criquets consommées par l'outarde, et est globalement un bon habitat écologique pour

⁷² Les observations empiriques des écologues ont fait ressortir une préférence des outardes pour ce type de prairies pour la nidification.

une diversité d'insectes et de petits mammifères. De plus c'est une plante mellifère⁷³ qui peut contribuer à l'alimentation des abeilles.

- Elle contribue à la régulation de la qualité et de la quantité d'eau utilisée par l'agriculture pour plusieurs raisons : elle nécessite peu de traitements phytosanitaires ; elle limite le ruissellement en laissant une couverture permanente sur le sol; elle augmente la capacité de rétention en eau du sol en améliorant la structure; elle capte l'azote minéral du sol et en limite le lessivage.
- Au plan agronomique, la luzerne constitue une bonne tête de rotation :
 - o Comme toutes les légumineuses, elle stocke l'azote atmosphérique grâce à un phénomène de symbiose avec une bactérie du sol. A l'échelle d'une rotation, elle diminue les besoins en azote des céréaliers car non seulement elle ne nécessite pas d'apport, mais de plus elle peut restituer l'azote qu'elle a stocké aux cultures qui lui succèdent si elle est enfouie dans le sol.
 - o Le fait qu'elle ne soit pas labourée pendant plusieurs années permet à ses racines de se développer et à la microfaune du sol de se multiplier. Cela permet d'améliorer la structure du sol, ce qui est bénéfique pour les cultures suivantes.
 - o Cette culture à fort pouvoir couvrant peut limiter le développement de certaines plantes adventices des grandes cultures ; elle permet donc de réduire l'utilisation d'herbicides sur les cultures suivantes.
- La luzerne permet d'allonger et de diversifier les rotations et peut notamment constituer un moyen de lutte contre certaines maladies ayant développé des résistances dans la région (en particulier le *sclerotinia* touchant le colza et le tournesol).
- Enfin, l'offre d'une production locale de fourrage riche en protéines peut être intéressante pour les éleveurs, dans le cadre de la traçabilité des produits voire d'une meilleure valorisation de leur production via des labels de qualité.

Toutefois la production de luzerne peut aussi présenter des difficultés et des contraintes ; parmi celles indiquées par des membres de la coopérative lors des entretiens préliminaires, nous retenons les suivantes : les risques de sécheresse lors d'une implantation en août-septembre, et de manière générale les incertitudes de rendement pour une luzerne non irriguée dans cette région marquée par les déficits hydriques ; les ravageurs pouvant affecter les récoltes, tels que les limaces

⁷³ Une plante mellifère est une plante produisant du nectar (substance liquide sucrée) récoltée par les insectes butineurs et les oiseaux nectarivores

ou les sitones ; les parasites difficiles à combattre tels que la cuscute ; le besoin en nutriments particulièrement consommés par la luzerne tels que le potassium, le phosphore, le bore et le molybdène. D'autres limites identifiées cette fois par les chercheurs du projet de recherche Praiterra (Lemaire 2009) sont les faibles incitations de la PAC, le cours élevé des céréales et les difficultés de la conduite d'une parcelle en luzerne. Ce projet a également montré une grande diversité des niveaux de production, liée parfois à une faible maîtrise de la culture en raison d'un défaut d'encadrement et de conseil technique sur cette culture considérée comme marginale.

Le choix de la luzerne était par ailleurs motivé par le fait que la plaine de Niort était autrefois une région de polyculture-élevage fortement productrice de luzerne, pour des raisons à la fois historiques (région spécialisée depuis longtemps dans la production de semences de luzerne) et pédoclimatiques (sols calcaires et bon ensoleillement). Toutefois la région Poitou-Charentes a connu au cours des dernières décennies une diminution très forte de la production de luzerne. Cette baisse est liée à la révolution fourragère des années 1970-80 qui a favorisé la production de maïs fourrager, plus productif et moins contraignant que les autres fourrages, ainsi que les importations de soja d'outre-Atlantique, au détriment de la production nationale de légumineuses. Au niveau national, la production de luzerne est passée de 1.7 millions d'ha dans les années 1960 à moins de 300 000 ha aujourd'hui (source : Etude NCA, 2012). La production de luzerne a particulièrement diminué dans la région en raison de la spécialisation d'une partie des exploitations agricoles dans les grandes cultures et d'une autre partie dans l'élevage hors-sol, dont les animaux sont nourris avec de la luzerne déshydratée importée de Champagne-Ardenne ou d'Espagne. Selon les écologues, la diminution de la biodiversité dans la plaine, et plus particulièrement le déclin de l'outarde canepetière, sont corrélés à cette diminution des surfaces en luzerne.

b. L'internalisation économique de la biodiversité, une voie privilégiée

L'offre de contrats incitatifs et le pilotage de la distribution des luzernes

Pour la mise en œuvre de mesures de conservation de l'outarde, les écologues ont exploré la possibilité de mettre en place des contrats avec les agriculteurs. Ces contrats prévoyaient de leur accorder une indemnisation en échange de la mise en place de pratiques contraignantes mais efficaces au plan environnemental. Le premier programme LIFE sur la conservation de l'outarde a permis de mettre en place un certain nombre de contrats expérimentaux avec les agriculteurs dont les actions ciblées étaient variées : retard de fauche, semis de couverts herbacés, implantation de bandes enherbées, mise en place de « jachères environnement et faune

sauvage », etc. (Jolivet 2001). Différents itinéraires techniques et leurs conséquences sur les populations d'outardes ont été testés. Ce programme s'est concrétisé par 520 ha en contrat mobilisant une centaine d'agriculteurs, et a permis de mettre au point les premiers cahiers des charges de contrats qui répondent aux exigences écologiques de l'outarde.

De 2001 à 2003, suite au programme LIFE, le CEBC a poursuivi sa démarche de conservation par la mise en place de « Contrats CNRS ». Ce type de contrat, inédit dans le milieu agricole, était établi en deux temps: tout d'abord une parcelle de luzerne était passée sous contrat avec au moins une coupe avant le 31 mai, mais l'exploitant n'était soumis à aucune autre contrainte, en dehors du fait qu'il devait autoriser les ornithologues à rechercher la présence de femelle d'outarde. Ce contrat, dit de type I, prévoyait une compensation de 30 euros/ha. Lorsqu'une femelle était présente sur une parcelle, celle-ci passait automatiquement en contrat de type II dit de « sauvetage d'urgence ». L'agriculteur s'engageait alors à suivre des mesures obligatoires, dont l'absence de fauche du couvert végétal et la non-application de produits phytosanitaires autour du nid. L'indemnisation était alors de 300 euros/ha pour un montant maximal de 900 euros par parcelle. Ces contrats ont été appliqués pendant 3 ans, et financés par la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) et le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER). Au total 150 ha ont été contractualisés.

Le Contrat Territorial d'Exploitation (CTE) est un dispositif agro-environnemental instauré au niveau national en 1999. Il a également permis de pérenniser les mesures du Programme LIFE, notamment dans les zones sur lesquelles le CEBC n'intervenait pas. Les Contrats d'Agriculture Durable (CAD) ont succédé aux CTE. En 2004 la Direction Départementale de l'Agriculture a demandé au CEBC d'élaborer un CAD type, en fonction des enjeux prioritaires du site d'étude. Le CNRS et la LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux) ont alors mis en place une vaste campagne d'animation sur le site auprès des agriculteurs. Ils ont signé 28 CAD « Préservation de l'avifaune menacée et de la faune associée » en 2004 pour une superficie de l'ordre de 500 ha, et 10 autres ont été signés en 2005. Le dispositif CAD a ensuite été remplacé par les mesures agro-environnementales territoriales (MAET). Les deux grandes priorités affichées au niveau national comme au niveau régional pour ces MAET sont la biodiversité remarquable et l'eau. Les deux syndicats producteurs d'eau potable présents sur le territoire, le SMEPDEP et le SEV⁷⁴, se sont mis d'accord avec le CNRS pour collaborer sur l'animation des MAET sur le territoire, au titre de l'enjeu « Eau ». Le centre de recherche et les animateurs des syndicats d'eau ont élaboré en

⁷⁴ SMEPDEP de la Vallée de la Courance (Syndicat Mixte d'Etudes, de Production et de Distribution d'Eau Potable) et SEV (Syndicat des Eaux du Vivier)

commun les cahiers des charges des MAET. Ces cahiers des charges portent notamment sur la conversion de cultures annuelles en prairies.

Pour piloter la distribution des prairies, les écologues du CEBC déterminent la localisation souhaitable des parcelles en luzerne en fonction de la présence des outardes, mais aussi en fonction des hypothèses scientifiques qu'ils cherchent à tester. Une fois les parcelles ciblées, les animateurs MAE négocient les contrats avec les agriculteurs correspondants. Les écologues considèrent les prairies comme un levier de gestion de l'agro-écosystème permettant de restaurer des régulations écologiques dans un écosystème fortement perturbé et d'en régénérer le réseau trophique. Dans cette configuration, les écologues du CEBC (i) produisent des connaissances en écologie, (ii) sont dotés de capacités de suivi de la répartition spatiale des prairies, et (iii) disposent de leviers d'action pour inciter au changement de pratiques agricoles. Ils sont donc devenus, dans une certaine mesure, des « concepteurs de la mosaïque paysagère » dans le territoire couvert par le dispositif MAET.

La simulation d'un marché local de foin de luzerne

En 2005, des chercheurs de l'INRA et les écologues du CEBC ont lancé conjointement les programmes de recherche Ecoger et Praitierre financés par l'INRA. Le premier visait à analyser et à quantifier l'impact des surfaces de prairies dans un territoire sur la biodiversité végétale et animale ; le second cherchait à identifier les conditions du maintien d'élevages utilisateurs de prairies au sein de ce même territoire, ainsi que la capacité des exploitations à générer une structure paysagère suffisamment diversifiée, favorable au maintien de la biodiversité. Le projet Praitierre visait notamment à étudier la possibilité de créer des échanges locaux de foin de luzerne entre céréaliers et éleveurs. Dans ce cadre, les chercheurs ont constitué un réseau de 24 exploitations, comprenant des céréaliers et des éleveurs, dont les choix techniques ont été suivis pendant 3 ans.

Le programme Praitierre (Lemaire 2009) a permis tout d'abord d'identifier les résultats potentiels de l'augmentation des surfaces en luzerne dans le contexte politico-économique actuel (en tenant compte de la réforme 2003 de la PAC instaurant le découplage des aides, de la possibilité d'irriguer et des MAE « Outarde »), en simulant notamment des échanges de foin de luzerne entre les exploitations céréalières et d'élevage. Selon la simulation menée, la surface totale en prairie de graminées MAE « outarde » augmente de 26%, celle en luzerne MAE de 49%. Des céréaliers et des éleveurs se mettent à vendre de la luzerne aux autres éleveurs.

Toutefois le projet Praiterre montrait aussi les limites des dispositifs en place en indiquant que les MAE « Outarde » actuelles ne permettent pas d'obtenir une surface prairie suffisante, ni une bonne répartition puisqu'elles se concentrent majoritairement dans les élevages (Lemaire 2009). Le projet suggérait qu'« une mosaïque paysagère acceptable pour l'outarde pourrait être obtenue par un menu de contrats proposant une combinaison de deux paiements dégressifs, incitant les céréaliers comme les éleveurs à mettre au moins une partie de leurs terres en luzerne » (*ibid.*). Le projet indiquait qu'une réintroduction de la culture de la luzerne dans les assolements céréaliers pouvait s'effectuer si un marché local de luzerne s'instaurait entre des céréaliers diversifiant ainsi leurs assolements, et des éleveurs caprins qui auraient ainsi accès à un aliment à un coût inférieur à celui du « déshydraté » acheté sur un marché national voire européen.

Cependant, les chercheurs contribuant au projet Praiterre n'ont envisagé l'augmentation de la production de luzerne qu'à travers la mise en place d'incitations économiques, notamment les MAE. Le projet a permis d'effectuer des scénarios et des simulations économiques de la réintroduction de luzerne, mais l'implantation effective de parcelles en luzerne n'a pas réellement augmenté dans le cadre du projet. Le projet Praiterre a apporté quelques éléments de réflexion sur une éventuelle filière, notamment sur la nécessité d'assurer la qualité du fourrage à l'aide de systèmes de séchage en grange collectif avec des énergies renouvelables. Cependant, ce dernier n'a pas conduit au montage d'une filière locale de foin de luzerne. Le réseau *ad hoc* d'exploitations volontaires constitué dans le cadre du projet n'a pas perduré, les échanges de fourrage entre céréaliers et éleveurs initiés non plus. Parmi les hypothèses pouvant expliquer ces résultats, on peut citer le fait que la création du réseau d'exploitants n'était pas de leur propre initiative et que le suivi n'a été réalisé que sur trois ans. Par conséquent les liens sociaux et de confiance ne se sont probablement pas suffisamment développés pour garantir la pérennité de l'action.

Les limites de l'internalisation économique de la biodiversité

Pendant une quinzaine d'années, la seule voie explorée par les écologues pour développer les cultures semi-pérennes dans la plaine céréalière jusqu'à la mise en place du projet de filière luzerne était celle de l'incitation économique individuelle à travers le contrat bilatéral. Cette solution revient à internaliser économiquement la préservation de la biodiversité. Cette voie présente des limites importantes. D'une part le système des mesures agro-environnementales (MAE) est très coûteux (les subventions versées aux agriculteurs peuvent atteindre 500 € /ha /an) ; d'autre part il est limité dans l'espace (les MAE sont appliquées dans des aires ciblées) et dans le temps (les contrats sont signés pour 5 ans). Par ailleurs, la mise en œuvre de l'objectif d'une augmentation des surfaces en prairies a suscité la contestation de la part d'un certain

nombre d'acteurs. Des représentants agricoles ont notamment empêché la validation du document d'objectifs (DOCOB) de la zone Natura 2000 qui affichait un objectif de maintien de 10% de « surfaces en herbe gérées favorablement » dans la ZPS. Le processus de concertation qui s'est déroulé de 2003 à 2007 pour réaliser le DOCOB visant à favoriser le développement de bandes enherbées et de prairies (qu'elles soient temporaires ou permanentes, de graminées ou de légumineuses) n'a pas abouti à un consensus. Ce blocage n'a pas empêché la mise en œuvre du document d'objectifs puisque les opérateurs MAE ont maintenu leur action d'animation et de contractualisation dans la ZPS. Cependant il reflète les tensions existant entre les acteurs du territoire au sujet de la réintroduction de prairies dans la plaine.

Si la production de luzerne semblait être une solution prometteuse pour les écologues de façon à concilier agriculture et environnement, les initiatives menées jusqu'à présent laissaient à penser qu'il était difficile de la développer sans incitation économique de la part des pouvoirs publics. Avec le projet de filière courte de luzerne mené en partenariat avec la coopérative CEA depuis 2010, une piste alternative fut envisagée par les chercheurs du CEBC, celle de l'auto-organisation. Nous allons voir à présent que l'effort de conception que nous avons mis en évidence n'était pas terminé, et qu'au contraire le projet était l'occasion de poursuivre le processus initié par le CEBC en impliquant non seulement un plus grand nombre de parties prenantes, mais aussi la prise en compte d'autres enjeux agro-écologiques et économiques.

Conclusion intermédiaire : les limites d'une approche économique des services écosystémiques

L'effort de conception est généralement masqué et implicite dans la littérature en économie sur les services écosystémiques. Nous avons vu dans notre analyse de cette littérature que l'approche économique des services écosystémiques consistait à identifier un certain nombre de services et de mettre au point des dispositifs de paiement des acteurs pour en favoriser la fourniture. Cette première phase de l'étude de cas nous a permis de souligner deux problèmes liés à une telle approche :

- (i) Dans cette étude de cas, en appliquant une approche économique mobilisant la notion de services écosystémiques, on aurait pu ne s'intéresser qu'aux dispositifs de paiements aux agriculteurs pour la mise en place de prairies, sans réellement s'interroger sur les raisons de l'intérêt des prairies, sur les autres solutions possibles ou sur les alternatives à l'incitation économique. La conception de moyens pour inciter les agriculteurs à implanter des prairies, notamment les contrats, a en effet nécessité de nombreux prototypages et expérimentations. Mais l'analyse rétrospective que nous

avons menée en mobilisant le cadre théorique de la conception a permis de mettre en évidence l'effort de conception nécessaire à l'identification d'une solution à mettre en œuvre pour remédier au déclin de la biodiversité : l'augmentation des surfaces en prairie et le pilotage de leur distribution. L'identification de cette solution est le résultat de plus de quinze ans de travaux de recherche des écologues du CEBC et d'un processus de conception qui a donné lieu à une multiplicité de voies envisagées.

- (ii) Initialement, deux services écosystémiques ont été identifiés par les écologues comme ayant de la valeur : la préservation de l'outarde canepetière et le maintien de l'activité agricole. Les écologues ont identifié et testé un dispositif nouveau pour concilier ces deux services, l'augmentation des surfaces en prairie et le pilotage de leur localisation dans l'espace. L'identification de cette solution a conduit les écologues à lancer de nouveaux projets de recherche visant à tester l'intérêt des prairies pour un ensemble plus vaste de services écosystémiques : la pollinisation, la préservation de la qualité de l'eau, la gestion des adventices, etc. Ainsi la conception de solutions pour répondre initialement à la conciliation de deux services écosystémiques perçus comme antagonistes les a conduits à prendre en compte de nouveaux services.

Dans le cadre de la thèse, nous avons suivi le montage et la mise en œuvre d'un projet qui vise à dépasser les limites de l'approche économique visant à internaliser les services écosystémiques dans les circuits économiques. A travers la filière courte de luzerne pilotée par une coopérative agricole, les écologues visent d'une part à étendre le territoire dans lequel serait implantée une plus grande proportion de prairies, et d'autre part à réduire les coûts de la mise en œuvre de cette solution. Pour mettre en œuvre cette filière, il faut explorer d'autres voies que celle de l'incitation économique, et même réinterroger la nature et l'intérêt écologique de la prairie. Nous étudions quels peuvent être les apports d'une approche par la conception pour y répondre, et quelles sont les nouvelles difficultés soulevées.

2. Enseignement du projet de filière luzerne : la nécessité d'inventer une démarche collective pour concevoir l'agro-écosystème

a. Des difficultés inattendues riches d'enseignement

Au départ du projet, une synergie apparente entre les initiatives du CEBC et celles de la coopérative CEA

Fin 2010, la coopérative CEA et le CEBC se sont mis d'accord pour expérimenter la mise en place d'une filière courte de luzerne de manière à augmenter cette production intéressante au plan écologique. La filière visait à développer des échanges de foin entre d'une part des producteurs de légumineuses, qu'ils soient éleveurs ou céréaliers, et d'autre part des éleveurs de caprins ou de bovins. L'objectif initial était de mettre au point un modèle viable économiquement, ne nécessitant des subventions qu'éventuellement lors de son lancement.

La mise en place de cette filière reposant sur un partenariat entre le CEBC et la coopérative CEA semblait être pour les écologues une très bonne opportunité de développer la production de luzerne à plus grande échelle que celle des zones en MAET (mesures agro-environnementales territoriales), de façon moins coûteuse pour les pouvoirs publics, et pérennisée par l'engagement de la coopérative. Les écologues voyaient dans ce projet à la fois une avancée en matière de conservation, mais aussi la possibilité de mener des expérimentations à large échelle (au-delà de la Zone Atelier). En quelque sorte, l'idée était de passer du modèle (les échanges locaux de luzerne avaient été imaginés dans le cadre du projet Praiterre) à la pratique. Les objectifs scientifiques initiaux étaient notamment de mieux comprendre et quantifier l'intérêt de l'insertion de parcelles en luzerne dans la plaine pour la biodiversité (insectes, oiseaux, adventices, mammifères), la régulation de la qualité et de la quantité d'eau, les émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, les écologues souhaitaient mettre en place différentes configurations d'implantation des prairies pour pouvoir tester des hypothèses quant à leur impact sur la biodiversité. Ils souhaitaient également mieux connaître et évaluer les intérêts agronomiques de la luzerne pour les grandes cultures. Enfin, dans le cadre de leur recherche-action, cela les intéressait d'étudier les opportunités de valoriser la luzerne et de développer les filières courtes de fourrage en Poitou-Charentes.

La décision de la coopérative CEA était motivée par le fait qu'il existe dans la région de nombreux élevages caprins et bovins laitiers nécessitant de la luzerne sous forme de fourrage, et que les rendements en grandes cultures ayant tendance à stagner notamment en raison de maladies, des céréaliers pourraient être intéressés par la réintroduction de luzerne dans leurs rotations. La coopérative proposait de jouer un rôle d'organisateur de la filière et d'intermédiaire

des échanges entre les agriculteurs, pour favoriser la mise en place de la filière courte sur son territoire et son maintien sur le long terme. Les représentants de la coopérative considéraient en effet les échanges informels de fourrage comme peu durables, et considéraient que la coopérative devait jouer un rôle de garantie des échanges et de mutualisation de certaines tâches, notamment l'évaluation de la qualité du fourrage, de manière à pérenniser la filière.

Des difficultés inattendues ou initialement minimisées

Le projet de mise en place d'une filière courte de luzerne pouvait paraître trivial de prime abord, pourtant plusieurs difficultés ont rapidement émergé. Etant donné la spécialisation des exploitations de la région en grandes cultures, l'idée initiale était d'inciter des céréaliers à devenir producteurs de luzerne. Cette production n'était généralement plus présente dans les rotations de grandes cultures. En effet, étant donnée la quasi-inexistence de marché de fourrage, la luzerne ne constituait pas *a priori* une production rentable pour les céréaliers. La coopérative craignait de ne pas réussir à convaincre les céréaliers de produire de la luzerne autrement qu'en leur promettant une incitation financière. Il lui semblait que les arguments agronomiques ne suffiraient pas à compenser le manque à gagner lié à l'implantation de luzerne. Les agriculteurs ont l'habitude de calculer la rentabilité d'une production à l'échelle d'une année, alors que l'intérêt économique de la luzerne ne peut être décelé qu'à l'échelle d'une rotation complète, soit au moins cinq ans. L'augmentation des surfaces en luzerne chez les céréaliers semblait donc difficile. Elle ne semblait pas plus facile chez les éleveurs : la plupart d'entre eux ont des surfaces agricoles moins étendues que les céréaliers. Etant donné la baisse globale des cours des produits de l'élevage, ils préfèrent diversifier leurs sources de revenus avec des cultures céréalières et limitent les surfaces en production fourragère.

Mettre en place une filière luzerne implique également de trouver des débouchés pour le fourrage. Cependant les échanges de foin de luzerne sont limités dans la région, soit parce que les éleveurs sont auto-suffisants, soit parce que les produits à base de luzerne échangés sur le marché sont des aliments industriels complets ou déshydratés (information confirmée par NCA, 2012). Une exploration des débouchés possibles pour la filière restait donc à approfondir.

Enfin, et surtout, la façon de produire la luzerne conditionne son intérêt au plan environnemental. En effet une luzerne produite de façon intensive, avec une forte densité de semis, l'utilisation de produits phytosanitaires, irriguée et fauchée quatre fois par an, n'est pas intéressante pour la biodiversité ni pour améliorer la qualité de l'eau. A l'inverse, produire une luzerne favorable aux outardes, notamment sans la faucher entre mai et juillet, n'est pas intéressant économiquement pour les agriculteurs. Ainsi, il semblait difficile pour les porteurs du

projet d'identifier les bons modes de conduite de la luzerne à mettre en place. Et cela d'autant plus que la mise en place d'une filière territoriale et environnementale de luzerne impliquait de concilier des objectifs variés et souvent *a priori* antagonistes : contribuer à préserver la biodiversité dans la plaine, diminuer les impacts négatifs des pratiques agricoles sur la qualité et la disponibilité de l'eau, préserver les sols, réduire les émissions de gaz à effet de serre, produire et développer des produits utiles à l'élevage et éventuellement à d'autres secteurs économiques, améliorer les relations entre le milieu agricole et les autres citoyens, etc.

L'analyse initiale mettait en évidence le fait que le projet de filière luzerne destiné à concilier des objectifs économiques et écologiques était complexe et soulevait des questions inédites, alors que la luzerne avait depuis longtemps été identifiée comme une solution intéressante par les écologues. La recherche-intervention visait à répondre aux questions empiriques suivantes : La luzerne peut-elle être une solution acceptable par les agriculteurs et dans quelles conditions ? Quelles modalités envisager pour la mise en place de la filière courte de luzerne ?

b. Ouvrir les options : vers un déblocage du projet par l'exploration de la multiplicité des fonctions et valeurs potentielles de la luzerne

Mise en évidence de la disjonction des espaces de conception des parties prenantes

À première vue, le projet de filière luzerne était l'occasion pour les acteurs ayant des intérêts divergents de collaborer et de s'entendre sur des objectifs communs. En réalité, les motivations initiales et les contraintes des deux parties étaient significativement différentes. En effet, la coopérative souhaitait favoriser une production de fourrage de haute qualité et avec les meilleurs rendements possibles. Les écologues quant à eux voyaient dans la mise en place de la filière le moyen d'étendre les surfaces peu perturbées dans la plaine céréalière plus favorables aux animaux sauvages. Ce que les acteurs nommaient les « prairies » faisait donc référence à des objets différents, et les attentes que les uns et les autres en avaient étaient plutôt antagonistes.

Dans un premier temps, il nous a semblé utile de mettre en évidence le fait que la solution envisagée par les écologues et la coopérative, la filière territoriale de luzerne, était déjà le résultat d'un processus de conception impliquant un certain nombre de choix (voir Figure 21). A différentes étapes, d'autres solutions auraient pu être envisagées qui n'auraient pas abouti au même résultat. Ce raisonnement de conception, nous l'avons vu précédemment, avait été mené quasiment exclusivement par les écologues. Nous avons également compris que les écologues associaient à la luzerne un certain nombre de propriétés spécifiques pour qu'elle soit vraiment intéressante au plan de la préservation de la biodiversité. La luzerne doit notamment consister en

un milieu le moins perturbé possible : ceci fait essentiellement référence à une faible perturbation des sols par le labour et à la non-utilisation de produits phytosanitaires. Les autres perturbations à éviter, dont nous avons connaissance, sont la fauche en période de nidification⁷⁵ des outardes et l'irrigation. Le moyen d'action privilégié par les écologues pour obtenir de telles luzernes est de signer des MAE avec les agriculteurs stipulant ces conditions.

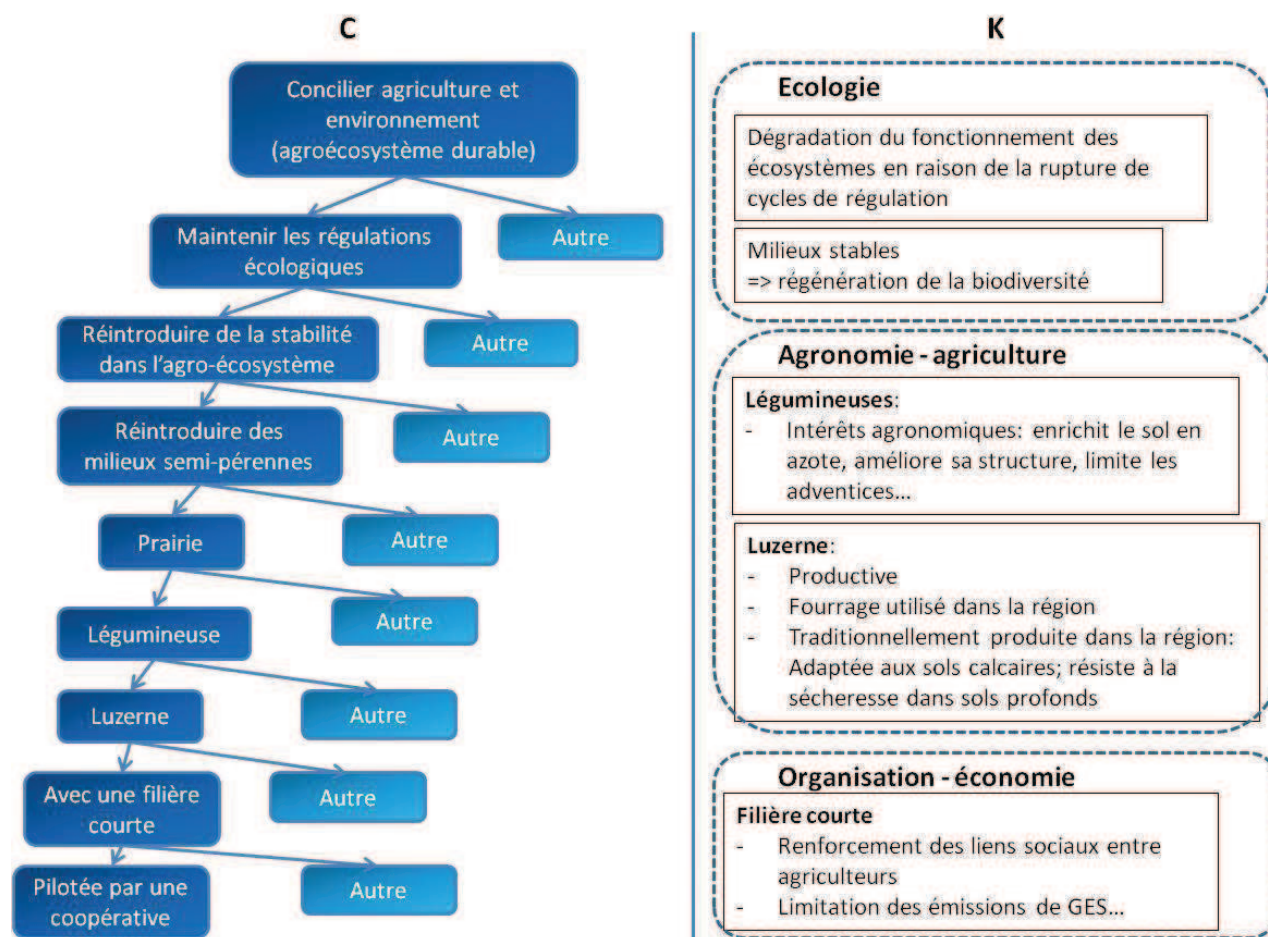


Figure 21 : Représentation schématique des choix faits par les écologues pour aboutir à la proposition d'une filière courte de luzerne.

A gauche, la branche en bleu foncé représente les décisions prises par les écologues parmi un ensemble d'options possibles ; à droite sont représentées les bases de connaissances mobilisées pour prendre ces décisions.

Le raisonnement des porteurs de projet de la coopérative les ayant conduits à accepter cette proposition de mise en place d'une filière luzerne n'est pas analogue à celui des écologues. En effet les connaissances dont ils disposent, leurs préoccupations, contraintes et critères d'évaluation ne sont pas les mêmes. La Figure 17 retranscrit le fait que pour les parties prenantes du monde agricole, la luzerne peut être une solution à différents problèmes environnementaux ;

⁷⁵ La vulnérabilité des outardes à la fauche s'étend du 15 mai à début août.

cependant il s'agit d'une alternative parmi un panel de solutions possibles. D'autre part pour ces acteurs, la préoccupation de production et de rentabilité économique prime sur les enjeux environnementaux. Les solutions envisagées doivent donc être évaluées selon ce critère. Or dans le contexte actuel de réduction du nombre d'éleveurs et d'industrialisation de l'élevage, la luzerne n'apparaît pas comme compétitive par rapport à d'autres solutions, telles que les techniques d'agriculture de précision pour limiter l'utilisation d'intrants.

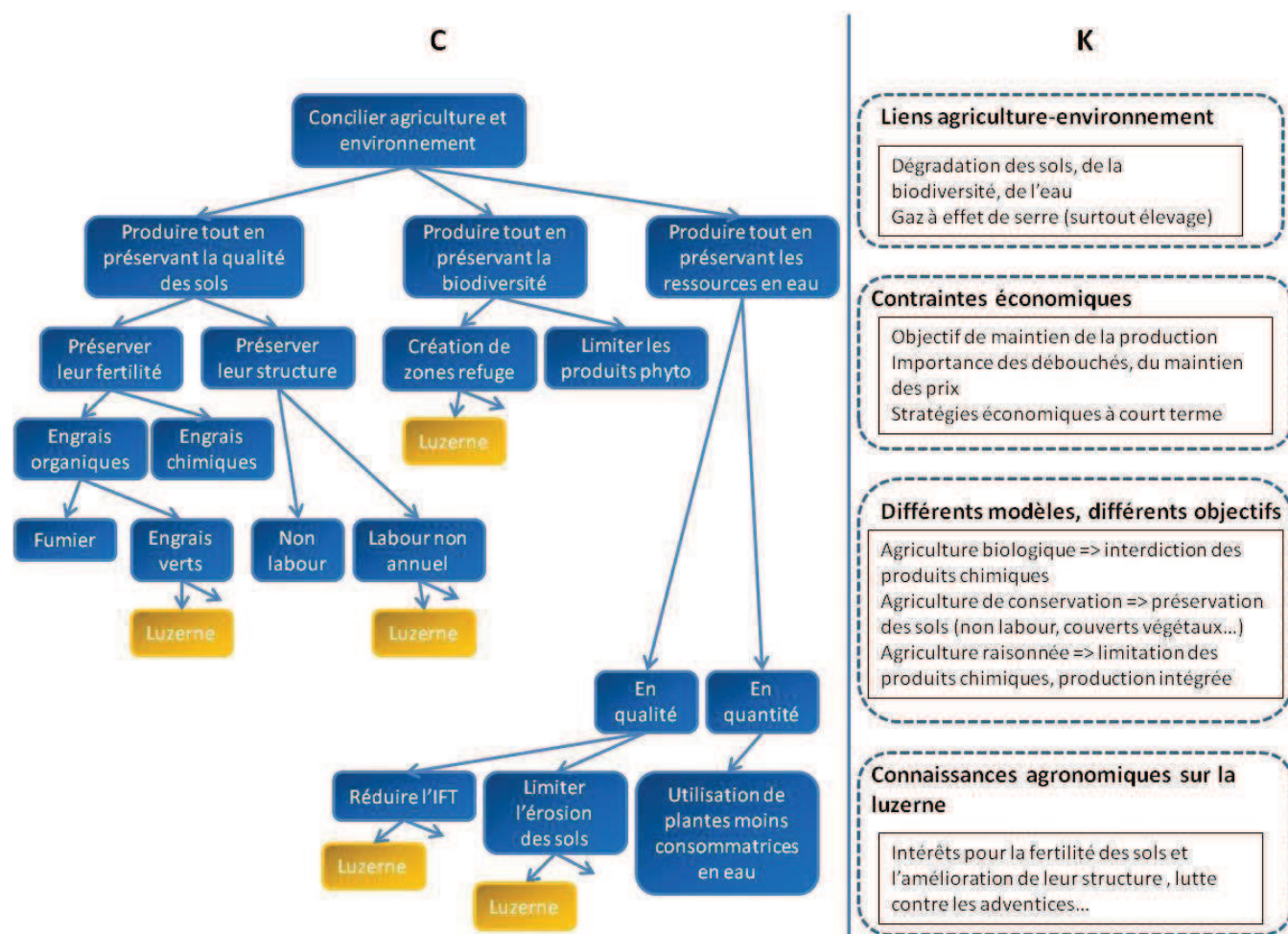


Figure 22 : Raisonnement de conception de solutions visant à améliorer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement du point de vue des agriculteurs.

A gauche, les premières partitions entre concepts sont pensées selon les grands enjeux environnementaux pris en compte par la CEA. La luzerne apparaît comme une solution à de multiples enjeux, mais n'est jamais la seule solution possible. A droite sont indiquées les principales bases de connaissances mobilisées.

Les deux figures précédentes mettent en évidence que si les parties prenantes du projet peuvent se rejoindre sur l'idée de promouvoir le développement de la luzerne, leurs raisonnements de conception sont différents, leurs espaces de conception sont même initialement disjoints. La

prairie de luzerne renvoie pour les écologues à un habitat écologique, mais aussi à une infrastructure écologique permettant de rétablir des régulations au sein de l'agro-écosystème. La prairie est donc pensée en tant que composante d'un paysage. La propriété principale de la prairie est pour les écologues le fait que ce soit un milieu moins perturbé que les cultures annuelles. S'ils associent à la prairie une diversité de couverts végétaux, il apparaît qu'à l'usage, ils associent plus particulièrement la luzerne au mot « prairie », étant donné les atouts écologiques et agronomiques de cette légumineuse. De plus, ce qui importe aux écologues est la configuration spatiale des prairies, avec des distances entre prairies suffisamment faibles pour qu'elles soient intéressantes au plan écologique. Pour les agriculteurs et la coopérative en revanche, une prairie correspond à une parcelle gérée par un agriculteur pour produire du fourrage ; elle peut être fauchée ou pâturée. Elle est donc généralement associée à l'activité d'élevage et s'inscrit dans la stratégie de gestion d'une exploitation. Les agriculteurs associent généralement à la prairie un couvert herbacé ; pour certains, la luzerne est qualifiée de « culture » et non de « prairie ». Ainsi pour chacune des parties prenantes du projet, la prairie renvoie à des objets dont certaines propriétés sont identiques, mais d'autres sont distinctes voire antagonistes.

Chaque type d'acteur, qu'il s'agisse des écologues ou des agriculteurs, explore des solutions visant à concilier production agricole et environnement, et tend à rapprocher son espace de conception de celui de l'autre : les chercheurs en écologie ont progressivement élargi leurs connaissances sur l'agriculture, tandis que les professionnels agricoles cherchent de plus en plus à acquérir de nouvelles connaissances sur l'environnement. Cependant, notre hypothèse était que la notion de prairie et ses intérêts écologiques devaient être clarifiés pour concevoir des solutions efficaces au plan écologique et acceptables par l'ensemble des parties prenantes. Sans cette clarification, surmonter les antagonismes initiaux autour de la notion de prairie et la disjonction des espaces de conception des acteurs ne nous paraissait pas possible.

La prairie : de la solution « clé-en-main » au point de départ d'un processus de conception collective

Nous avons proposé d'organiser un atelier de conception collective pour mieux définir les contours du projet et explorer les voies possibles avant de se lancer dans celle qui paraissait la plus évidente. La coopérative CEA et l'équipe du CEBC ont accepté cette démarche. Pour organiser l'atelier, nous nous sommes appuyés sur la méthode KCP (voir méthodologie). Après avoir mis en évidence la différence de représentations et de critères d'évaluation de la prairie, nous avons proposé pour l'atelier de considérer la prairie comme un « concept » (Hatchuel and Weil 2003), c'est-à-dire un objet incomplètement conçu, partiellement inconnu, pouvant constituer le point de départ d'un processus de conception. L'objectif de l'atelier KCP était donc

d'interroger l'identité de la prairie, d'explorer et d'étendre ses fonctions attendues ou valeurs associées, et non de la considérer comme un objet connu dont il suffisait d'augmenter la surface. Dans le cadre de l'atelier KCP, nous avons essentiellement mobilisé le cadre d'analyse des services écosystémiques pour explorer les fonctions possibles de la prairie. Pour des raisons de temps, nous avons ciblé cette analyse de la prairie sur la luzerne.

Les connaissances rassemblées lors de cet atelier ont permis d'étendre la liste des attributs de la luzerne, d'une part en élargissant sa gamme de fonctions agronomiques et écologiques, d'autre part en explorant la faisabilité de nouveaux paramètres de conception/ de production de la luzerne. Suite à l'atelier et au travail de deux élèves-ingénieur d'Agroparistech que nous avons encadrées, un tableau⁷⁶ recensant en colonne les services écosystémiques rendus par la luzerne et en ligne les principales opérations culturales et options possibles a été réalisé. Ce travail a permis tout d'abord d'identifier les manques de connaissances sur les relations entre paramètres de l'itinéraire technique et effet sur les services rendus par la luzerne. D'autre part grâce à la mise au point d'un système de notation, il a permis de comparer différents itinéraires techniques et d'identifier leurs effets attendus sur un ensemble de services écosystémiques (voir Figure 23). Par exemple, des systèmes visant de hauts rendements en luzerne ont des effets négatifs sur la biodiversité et la qualité de l'eau, notamment en raison de l'utilisation d'intrants chimiques, d'une perturbation fréquente du milieu et une durée d'implantation courte ; l'itinéraire technique en « agriculture biologique » réussit à valoriser l'ensemble des services écosystémiques, mais peut poser des difficultés en termes de gestion des adventices et globalement l'intensité des effets reste limitée ; enfin l'itinéraire technique de la mesure agro-environnementale « Reconversion de terres arables en couvert herbacé favorable à l'outarde » conduit à une faible production de fourrage mais assure une très bonne protection de la biodiversité, du sol et de la ressource en eau (Bouty and Bouviala 2012).

⁷⁶ Voir Annexe 5

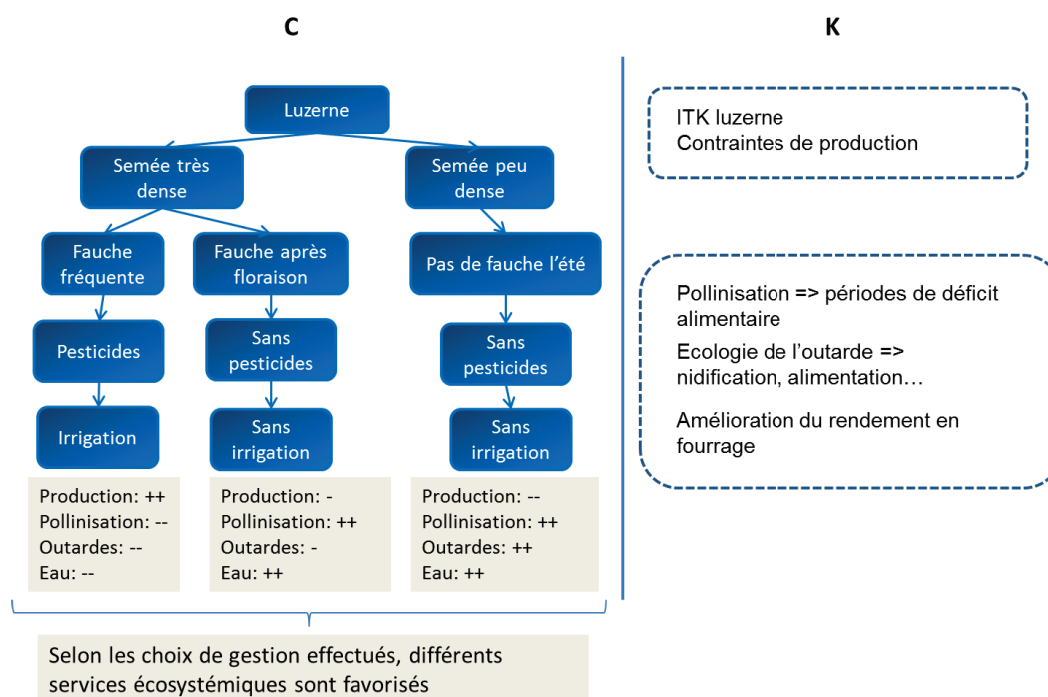


Figure 23 : Quelques itinéraires techniques et leurs effets attendus concernant une sélection de services écosystémiques.

En-dessous de chaque branche de concepts sont indiqués les impacts sur quatre grands types de services écosystémiques : production agricole, pollinisation, conservation des outardes et préservation de la qualité de l'eau.

Ce travail d'exploration a permis de mettre en évidence les antagonismes concernant certains paramètres-clés : par exemple, une fauche avant la floraison est *a priori* meilleure du point de vue de la qualité du fourrage, mais peu favorable à l'alimentation des abeilles, qui dans les zones de grandes cultures subissent un déficit alimentaire en juin (Requier *et al.* 2012). Des marges de manœuvre ont alors été recherchées pour surmonter ces antagonismes : par exemple, pour les deuxième et troisième coupe de la luzerne, qui ont lieu respectivement en juillet et septembre, le fait d'attendre la floraison est moins problématique que pour la première coupe car la luzerne pousse plus lentement ; de plus cela permet à la plante de constituer davantage de réserves donc d'avoir une durée de vie plus longue (Communication personnelle G. Lemaire).

Par ailleurs concernant la récolte, les marges de manœuvre ne sont pas négligeables : la luzerne peut être récoltée en foin, puis séchée naturellement ou au moyen de séchoirs. La récolte peut aussi se faire par enrubannage ou ensilage (pour les mélanges luzerne-graminées) si le temps est trop humide ou si la première coupe doit être réalisée plus tôt dans l'année. Il existe aussi des conservateurs de foin de luzerne tels que l'acide propionique. La luzerne peut être déshydratée et transformée en brins longs ou en bouchons. Cette diversité de modes de récolte possibles peut permettre à la fois de sécuriser les rendements malgré les aléas climatiques et de concilier des enjeux environnementaux avec les enjeux de production. Cette exploration a donc permis de ne

pas faire porter les discussions entre parties prenantes que sur la surface en luzerne à implanter, mais aussi sur les types de luzerne à mettre en place, selon les services écosystémiques ciblés.

L'expansion des espaces de conception des différentes parties prenantes par l'identification de nouveaux paramètres de conception de la luzerne a permis d'identifier des voies intermédiaires entre d'une part l'itinéraire technique correspondant à une production de luzerne intensive défavorable à la biodiversité, et d'autre part celui correspondant à la MAE « Reconversion de terres arables en couvert herbacé favorable à l'outarde » qui réduit significativement la production de luzerne donc nécessite une compensation financière (voir Figure 24). Le fait de considérer la luzerne, et a fortiori la prairie, comme un concept a permis d'en identifier de nouvelles propriétés qui rendent conciliables les propriétés de production fourragère et de préservation de la biodiversité. Par exemple, alors que les agriculteurs désherbent quasi-automatiquement leur luzerne par voie chimique, les écologues travaillent depuis plusieurs années sur le contrôle des adventices par la gestion des dates de fauche.

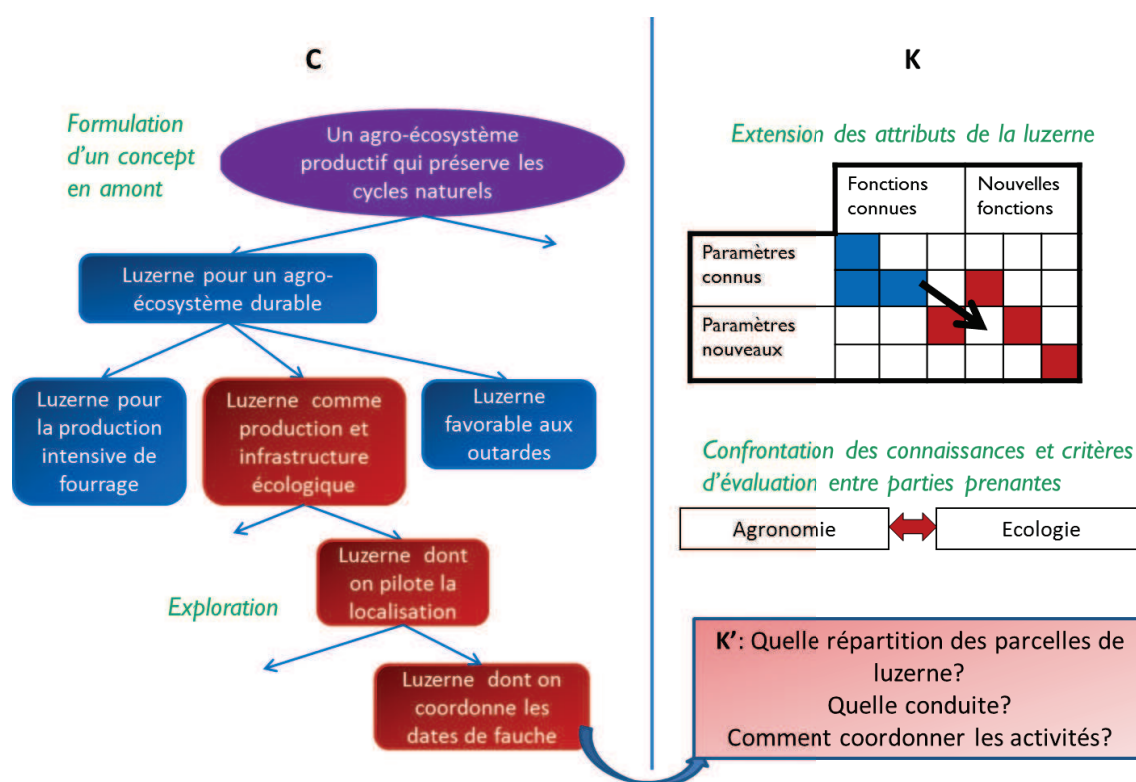


Figure 24 : L'exploration de nouvelles formes de luzerne possibles

A gauche, espace des concepts ; à droite, espace des connaissances. Le concept initial est « la luzerne pour un agro-écosystème durable » ; on a d'un côté la luzerne souhaitée par les agriculteurs, de l'autre celle souhaitée par les écologues. L'exploration ouvre d'autres voies possibles (en rouge) ; elle permet aussi d'identifier un « rétroconcept » plus amont (en violet), qui élargit le processus d'exploration. L'expansion des concepts est permise par l'expansion des connaissances, liée à l'identification de nouveaux attributs de la prairie (paramètres et fonctions) et à la mise en commun de critères d'évaluation. L'expansion des concepts guide la production de nouvelles connaissances, par exemple sur la répartition des parcelles de luzerne.

L'exploration a mis en évidence l'importance de paramètres de gestion collective des prairies, notamment la coordination des dates de fauche, mais surtout la localisation des prairies dans l'espace. Celle-ci peut avoir un impact sur la dynamique de populations d'insectes (une dispersion aléatoire dans le paysage sera alors favorable), mais aussi sur la qualité de l'eau (concentration des parcelles autour des bassins de captage d'eau potable, sur les zones dont les sols sont sensibles au lessivage...). Cette exploration a permis de rendre visibles les interdépendances entre les différents acteurs du territoire, et de faire émerger l'agro-écosystème en tant que support de ces interdépendances et objet de conception collective. L'identité de la prairie est révisée: d'un objet privé géré individuellement, elle devient une infrastructure écologique à gérer en commun, un levier pour concevoir collectivement de nouvelles configurations de l'agro-écosystème. Ce processus d'exploration a également permis de mettre en commun les connaissances d'acteurs dont les intérêts initiaux étaient divergents et d'étendre les connaissances propres à chacun : un nouvel espace de conception en commun a été ouvert par l'atelier.

La proposition d'augmenter les surfaces en prairie a d'abord plutôt alimenté les tensions existant entre les agriculteurs et les écologistes. Le fait de considérer les prairies comme un « concept » a conduit les acteurs à réinterroger l'identité de la prairie, à revenir sur des hypothèses implicites pour chacune des parties, et à redonner une part d'inconnu permettant de se projeter dans un projet collectif. Cela a permis de ré-ouvrir l'éventail des solutions alternatives et d'en explorer de plus créatives que le fait de diminuer la production agricole.

Le lancement d'un programme de recherche-action en soutien au projet

L'atelier de conception a mis en évidence le besoin de connaissances nécessaire à la réalisation du projet. La coopérative, prenant conscience de la difficulté que pouvait représenter la mise en place d'une telle filière, a cherché un soutien financier de la part des collectivités locales. Il a donc été décidé, suite à cet atelier, de réaliser une étude de faisabilité économique de la filière luzerne et de monter un programme de recherche-action pour produire les connaissances nécessaires à la conciliation des différents enjeux économiques et écologiques du projet.

L'étude de faisabilité de la filière luzerne visait à identifier les caractéristiques du marché de la luzerne ainsi que les opportunités de développement d'une telle filière. Elle a été confiée à un bureau d'étude et cofinancée par la coopérative et la Région Poitou-Charentes. Ses résultats ont été présentés en décembre 2012 et ont identifié un certain nombre de risques et d'opportunités sur le montage de la filière luzerne. L'étude a surtout étudié les bassins de production et de consommation de luzerne et les tendances actuelles et à venir. Elle a identifié pour la coopérative un marché potentiel limité mais existant. Le bureau d'étude a également exploré différentes

modalités de filières possibles, avec des types de débouchés variés : vente de luzerne sur pied, vente de foin, séchage, déshydratation, production de semences... La production de foin et de semences de luzerne semblent être à privilégier. Une préconisation pour la coopérative était toutefois de diversifier les types de débouchés (luzerne vendue aux éleveurs sous forme de foin ou sur pied, mais aussi déshydratation via une entreprise locale) pour minimiser les risques.

Le programme de recherche-action a été lancé début 2012 par le CEBC et CEA ; il implique des chercheurs de l'INRA et les animateurs des deux syndicats d'eau du territoire, le SMEPDEP et le syndicat de la Vallée de la Boutonne. Le projet est actuellement cofinancé par le Conseil Régional de Poitou-Charentes et les Conseils Généraux des Deux-Sèvres (79) et de Charente-Maritime (17). Il vise à produire, en parallèle de la mise en place de la filière, des connaissances indispensables pour concilier les enjeux techniques, environnementaux et économiques. Ces connaissances concernent le fonctionnement de l'agro-écosystème et l'impact de certaines pratiques de production de la luzerne sur la biodiversité et la qualité de l'eau ; le projet vise à proposer des innovations en termes d'itinéraires techniques de la luzerne. Le projet a également pour objectif de réfléchir à de nouvelles règles de gouvernance pour la filière luzerne, des formes de contrats innovantes et des outils et méthodes pour la conception et l'évaluation multicritère des actions à mettre en place : grilles d'évaluation partagées, outil de simulation de différents itinéraires techniques de la luzerne, etc. Le collectif de pilotage du programme est constitué de membres de la coopérative, des chercheurs en écologie du CEBC et en agronomie de l'INRA et des collectivités locales partenaires (Conseil Régional de Poitou-Charentes, Conseils Généraux de Charente-Maritime et des Deux-Sèvres, syndicats d'eau et Agences de l'eau). Ce programme de recherche donne un cadre institutionnel au partenariat entre la coopérative et le centre de recherche et renforce leur engagement, non seulement mutuel mais aussi vis-à-vis de tiers qui leur ont alloué des sommes publiques.

La conception de l'agro-écosystème, de nouvelles perspectives par rapport aux services écosystémiques

Un concept central dans la littérature sur les services écosystémiques est celle des *trade-off* (ou compromis) entre services. Dans le cas étudié, la solution de mettre en place des prairies ne correspond pas à un simple compromis entre la production et la biodiversité : les acteurs n'ont pas décidé de réduire l'intensité de la production agricole, mais de produire autrement. La conception innovante vise à identifier des solutions nouvelles qui permettent de sortir d'un compromis entre deux voies connues. Pour identifier la prairie comme solution de gestion de l'agro-écosystème, les écologues avaient ciblé deux services que sont la production agricole et la conservation des outardes. L'exploration collective impliquant de nouveaux acteurs a contribué à

étendre la liste des services pouvant être gérés avec la prairie ; une exploration plus poussée aurait même pu faire émerger des services initialement inconnus. Ainsi, au lieu de cibler *a priori* des services écosystémiques pour mettre en œuvre des solutions de gestion, différentes configurations de prairies ont été explorées de façon à produire différents faisceaux de services écosystémiques.

L'atelier mis en œuvre n'était donc pas une simple arène de négociation sur des biens connus et aux valeurs définies, mais une occasion de réinterroger l'identité d'objets considérés comme connus, ici la prairie, et d'en explorer collectivement de nouvelles formes pour concilier production agricole et conservation de la biodiversité.

c. Inventer une gouvernance adaptée au pilotage d'un projet innovant de filière luzerne

Les enjeux de gouvernance soulevés par la démarche de conception collective

L'analyse des difficultés liées au montage du projet de filière luzerne a mis en évidence le désaccord initial entre les parties prenantes du projet sur l'adoption d'une solution de gestion commune de l'agro-écosystème céréalier, la réintroduction de prairies. Notre analyse était que ce désaccord était lié à la différence de perception de la prairie par les écologues d'une part et les professionnels agricoles d'autre part, c'est-à-dire au fait qu'ils lui attribuaient des propriétés variées et contradictoires. Un premier enjeu de gouvernance du projet était donc de surmonter les positions divergentes entre ces acteurs sur la prairie, en considérant cette dernière comme le point de départ d'un processus collectif de conception. L'idée était d'étendre les attributs possibles de la prairie, et d'en inventer de nouvelles formes permettant de concilier production agricole, préservation de la biodiversité et même production d'une diversité de services écosystémiques.

L'hypothèse motivant cette proposition était la suivante : si les échanges et négociations entre acteurs portent sur des valeurs données alors que leurs intérêts divergent, les risques de blocage ou de comportement de passager clandestin sont plus forts que si l'on considère que de nouvelles valeurs restent à concevoir. Cette hypothèse implique que, dans certaines situations, l'augmentation de la part d'inconnu peut permettre de redonner une certaine marge de manœuvre aux acteurs, créer des espaces d'opportunité, et aider à surmonter des situations conflictuelles. Elle se démarque de celle d'Ostrom (1990) selon laquelle le manque de connaissances sur le système de ressources est l'un des principaux freins à la mise en place d'une action collective.

Ainsi, contrairement à des situations où l'on cherche à éviter des conflits ou à chercher des compromis, le principe de management identifié dans notre étude de cas est de traiter le conflit de manière créative. En effet, la réconciliation d'intérêts contradictoires nécessite de redéfinir de

manière innovante les objets, d'en définir de nouveaux contours, par exemple en explorant de nouveaux modèles d'affaires, de nouvelles variantes ou combinaisons technologiques, une nouvelle compréhension des contraintes, etc. Le fait d'avoir considéré la prairie comme le point de départ d'un processus de conception, et non pas comme une solution clé-en-main, a permis de dépasser, au moins dans un premier temps, la situation conflictuelle autour de cette solution. Contrairement aux cas étudiés par Ostrom, l'action collective n'a pas été initiée suite à l'identification d'un bien commun, mais parce qu'un espace collectif de conception a été ouvert pour pouvoir explorer des solutions générant un intérêt commun.

Le processus collectif de conception soulève en tant que tel des questions de gouvernance pour les parties prenantes du projet : par exemple, qui impliquer dans cette conception collective ? Le collectif de conception doit-il se limiter aux membres de la coopérative et aux écologues du CEBC, ou faut-il impliquer des agriculteurs et d'autres acteurs du territoire ? En organisant un atelier de conception collective dans lequel des techniciens de chambre d'agriculture et de syndicats d'eau, des agriculteurs et des élus locaux ont participé, CEA et le CEBC ont choisi d'élargir un peu le collectif initial. Cependant l'atelier de conception a été très ponctuel. Il a été ciblé sur les propriétés potentielles de la luzerne, mais d'autres questions restent à traiter par une approche de conception. Par exemple, quelles sont les autres solutions possibles que la luzerne pour améliorer l'état de l'agro-écosystème ? Quelles sont les innovations techniques qui permettraient de mieux concilier la production de fourrage et la préservation des oiseaux ? Etc. Les acteurs doivent aujourd'hui réfléchir aux règles de gouvernance qui permettraient de poursuivre la démarche de conception collective. Cette question soulève celle de l'évaluation des résultats de la conception sur le long terme. De premières réflexions ont porté sur des outils d'évaluation multicritères des itinéraires techniques mis en place, en mobilisant par exemple la notion de faisceaux de services écosystémiques. Ces réflexions nécessitent d'être poursuivies.

Les enjeux de gouvernance liés à la mise en œuvre de la filière luzerne

Lors de l'atelier de conception collective, une stratégie a fait l'objet d'un intérêt de la part de plusieurs acteurs : favoriser une diversité de pratiques, de manière à atteindre une multiplicité d'objectifs. Il était d'une part proposé d'introduire différentes formes de prairies (permanentes, temporaires, des bandes enherbées, etc.) ; d'autre part il semblait nécessaire de définir différents niveaux d'exigence en termes de qualité des produits issus de la luzerne. Ces questions conduisent la coopérative à s'interroger sur son rôle dans le pilotage de la filière luzerne. Comment peut-elle se positionner pour optimiser les bénéfices individuels et collectifs liés à un tel projet ? Il s'agit

non seulement de faciliter au maximum les échanges de produits issus de la luzerne, mais aussi d'assurer l'intérêt environnemental du projet.

Suite à l'atelier, nous avons identifié trois positionnements possibles de la coopérative pour gérer la filière luzerne :

1. La coopérative comme « **organisme support** » : l'objectif poursuivi est ici essentiellement d'augmenter la surface en luzerne, sans chercher à imposer de contrainte sur l'itinéraire technique ou sur la localisation des parcelles. Un premier avantage de cette voie est de laisser un maximum d'autonomie aux agriculteurs, ce qui les conduira peut-être davantage à adhérer au projet ; un second avantage est de ne pas présenter de grande difficulté de gestion pour la coopérative. Toutefois le désavantage principal est que dans ces conditions le projet risque de ne pas atteindre ses objectifs environnementaux.
2. La coopérative comme « **prescripteur** » : le principe de cette voie est que la coopérative hiérarchise elle-même les valeurs du projet et qu'elle impose un cahier des charges de production à l'ensemble des agriculteurs. L'avantage est que là encore cette voie ne présente pas de difficulté de gestion particulière pour la coopérative. Un premier désavantage est que les agriculteurs se sentent trop contraints pour adhérer au projet ; de plus si la coopérative fait des choix qui vont à l'encontre des intérêts des autres parties prenantes du territoire, là encore le projet n'atteindra pas ses objectifs. Une variante de cette voie est de constituer un comité de pilotage dans lequel sont représentées différentes parties prenantes qui y prendraient leurs décisions de façon collégiale ;
3. La coopérative comme « **gestionnaire de la diversité** » : dans ce cas, l'objectif n'est pas de hiérarchiser les valeurs et d'en cibler certaines, mais plutôt de favoriser un système hétérogène. D'après ce qui avait été identifié suite aux entretiens et qui a été confirmé par l'atelier, l'avantage est qu'une hétérogénéité de pratiques et de moyens d'action mis en œuvre peut permettre de concilier une diversité d'objectifs dont certains sont antagonistes. Les écologues sont donc plutôt favorables à cette voie. Le désavantage pour la coopérative est qu'un système avec des pratiques de production et des produits hétérogènes est plus difficile à gérer.

Durant la phase de mise en place de la filière luzerne, c'est plutôt la première voie qui a été choisie par la coopérative. Suite à l'atelier de conception collective, celle-ci n'a pas remis en cause son projet initial de favoriser des itinéraires techniques maximisant la production de luzerne, au risque de ne pas atteindre les objectifs de préservation de la biodiversité et de la qualité de l'eau.

La coopérative a élaboré un contrat à signer avec des producteurs de luzerne ne donnant aucune prescription quant à l'emploi de produits phytosanitaires (les techniciens conseillant un désherbage la première année d'implantation de la luzerne), ou quant à la localisation des parcelles de luzerne. Ce choix de la coopérative peut s'expliquer par le fait qu'elle a préféré rester prudente lors de la période de lancement de projet, d'une part en assurant une bonne qualité du fourrage, vu que la recherche des débouchés en foin de luzerne n'était pas encore très avancée, et d'autre part en n'imposant pas trop de contraintes aux producteurs. Pour la coopérative, le fait d'imposer aux céréaliers des contraintes en termes de cahier des charges et de localisation des parcelles lui semble antagoniste avec le fait qu'elle cherche à développer la filière. Enfin la coopérative justifie cette décision par le fait que le montage de la filière, notamment l'organisation de la récolte et des aspects logistiques, est déjà compliqué à mettre en œuvre pour une petite structure, et qu'il lui faut hiérarchiser les priorités.

Le risque de cette stratégie retenue par la coopérative est que les objectifs environnementaux du projet ne soient pas atteints, ce qui suscite des craintes de la part des écologues du CEBC. Cela nous conduit à réfléchir aux modalités de gouvernance à inventer pour concilier les enjeux économiques, techniques et environnementaux du projet.

Quel type de collectif pour prendre en charge ces nouveaux enjeux de gouvernance ?

La coopérative se lance de manière prudente dans le projet : en raison des incertitudes et du potentiel risque économique lié au développement de la luzerne sur sa zone de collecte, elle ne préfère pas implanter des surfaces en luzerne trop importantes trop vite. L'organisation de la récolte, la conservation et la vente de foin lors de la première année du projet (en 2012) a été difficile : la coopérative a perdu près d'un tiers de la récolte en raison de mauvaises conditions météorologiques lors de la récolte et d'un problème technique concernant la conservation du fourrage. De tels aléas représentent pour cette petite structure un risque économique important. Malgré l'aide allouée par les collectivités locales pour soutenir la mise en œuvre du projet, la coopérative n'aura implanté que 60 ha de luzerne fin 2013, un chiffre en-deçà de l'engagement pris dans le cadre du programme de recherche-action d'implanter 500 ha de luzerne avant fin 2014.

Ce projet soulève la question du type d'organisation à la fois légitime et capable de porter un projet innovant, complexe et risqué comme celui d'une filière courte de luzerne pour concilier grandes cultures, préservation de la biodiversité et de la qualité de l'eau. La coopérative, lors du lancement du projet, a souhaité jouer le rôle de catalyseur de nouvelles pratiques plus respectueuses de l'environnement, voire de la mise en place de nouvelles normes d'action

collective pour une gestion des productions et des processus écologiques à l'échelle du paysage. La formulation du mythe rationnel (Hatchuel 2008) de la coopérative en tant que « gestionnaire du territoire » a constitué le point de départ de l'action collective dans un contexte de divergence d'intérêts entre les acteurs. Cette notion de gestionnaire du territoire reflète la mission d'organiser la gestion économique et écologique de l'agro-écosystème et de garantir la durabilité des échanges.

Selon David (2002), un mythe rationnel permet de construire l'action collective car il a les propriétés mobilisatrices du mythe et les propriétés opérationnelles du raisonnement. Il permet un apprentissage collectif lié à la fois à la production de connaissances nouvelles et à la construction de nouvelles figures d'acteurs, dont les difficultés, l'impact et l'exemplarité éventuelle peuvent être étudiés par le chercheur-intervenant (Hatchuel 2008). Ce mythe rationnel a permis d'initier le projet et d'en dessiner les contours. Il faudrait à présent réfléchir au collectif adapté à ce type de projet. L'implication de la coopérative est intéressante car elle permet d'explorer les leviers possibles au niveau de la filière pour explorer des valeurs nouvelles (mise en place de label de qualité pour le fromage de chèvres nourries avec de la luzerne locale et écologique par exemple). La coopérative permet également de déployer le projet sur un territoire assez vaste concernant près de 400 exploitations agricoles. Cependant l'étude de cas a montré que cette organisation avait besoin de s'associer à d'autres acteurs pour concevoir et mettre en œuvre un projet territorial intéressant au plan écologique. La plupart des coopératives, mises à part peut-être les très grosses structures, ne disposent pas des connaissances, des compétences et des outils nécessaires à la conception d'un tel projet et au suivi de ses impacts environnementaux à long terme. De plus, selon les situations, le territoire de collecte d'une coopérative peut ne pas couvrir une proportion suffisante des parcelles cultivées du territoire pour pouvoir configurer la mosaïque paysagère. Nous poursuivons la réflexion sur le type de collectif et sur les stratégies de gestion qui seraient appropriés pour reproduire des initiatives analogues dans d'autres agro-écosystèmes céréaliers dans la suite de la thèse.

Conclusion de la Partie 3

Le potentiel d'apprentissage (Hatchuel and David 2007) du cas que nous avons étudié est particulièrement élevé. D'une part, les initiatives empiriques nécessitaient un accompagnement ; elles nous ont permis de comprendre les difficultés auxquelles les acteurs étaient confrontés, et de tester la mise en place d'une démarche de conception de l'agro-écosystème. D'autre part, le cas nous a permis de discuter les acquis de la littérature sur les services écosystémiques et d'identifier que les modèles d'action proposés ne permettaient pas de surmonter les difficultés rencontrées.

L'analyse rétrospective que nous avons menée en mobilisant le cadre théorique de la conception a permis de mettre en évidence l'effort de conception réalisé par les écologues pour identifier une solution au déclin de la biodiversité : la réinsertion de prairies dans la plaine et le pilotage de leur distribution. Ce processus de conception qui visait initialement à concilier deux services écosystémiques perçus comme antagonistes a conduit les écologues à prendre en compte de nouveaux services.

L'accompagnement du projet de filière luzerne écologique montre que le fait de conduire des acteurs qui ont des intérêts divergents vis-à-vis de l'agro-écosystème à concevoir ensemble des solutions de gestion collectivement souhaitables peut créer des conditions favorables pour surmonter une situation de blocage de l'innovation. Elle montre aussi que le fait d'explorer des solutions souhaitables au-delà de ce qui est connu est difficile. Le pilotage d'un processus collectif de conception nécessiterait d'outiller davantage les acteurs du territoire et de penser de nouvelles formes d'interactions entre les acteurs.

Partie 4 : Modèle pour la conception collective des agro-écosystèmes et implications managériales

Introduction de la Partie 4

Nous nous appuyons sur l'analyse de la littérature et l'étude de cas empirique pour proposer un modèle visant à outiller la conception d'un agro-écosystème. Dans un premier temps, nous mobilisons les travaux de Hatchuel *et al.* (2013) pour mettre en évidence les spécificités d'un raisonnement de conception par comparaison aux raisonnements de modélisation et de décision actuellement mobilisés dans la littérature sur la gestion des écosystèmes. Ensuite nous montrons la direction à prendre pour qualifier ce qui peut faire l'objet de la conception, et montrons les apports de l'économiste Georgescu-Roegen (1971) sur cette question en analysant son modèle « fonds-flux ». Nous exposons alors notre propre modèle théorique qui permet de qualifier un agro-écosystème et d'outiller les processus de gouvernance pour en soutenir la conception. L'objet à concevoir est le « fonds écologique », que l'on peut déterminer à l'aide d'un « sous-jacent », une propriété rendant compte de régulations écologiques à préserver. Pour faire de ce fonds écologique le point de départ d'un processus collectif de conception, nous le qualifions d'« inconnu commun ». A partir de ce modèle, nous mettons en évidence les nouveaux enjeux de gouvernance soulevés par le fait de considérer le fonds écologique comme un inconnu commun et non comme un bien commun. Nous proposons quelques pistes managériales pour les prendre en charge et réfléchissons aux types de collectifs appropriés.

Chapitre I. Proposition d'un modèle pour la conception d'un agro-écosystème

1. Changer de perspective pour innover : de la modélisation à la conception des agro-écosystèmes

a. Préambule : l'intérêt de la conception pour traiter des agro-écosystèmes

La prise en compte de la conception pour gérer des agro-écosystèmes est nécessaire à nos yeux pour au moins quatre raisons. Premièrement, la conception est bien présente dans la gestion des agro-écosystèmes : elle peut porter sur des objets très divers, qu'il s'agisse de variétés à cultiver ou de races animales, de systèmes de culture, de systèmes techniques, d'organisation individuelle (à l'échelle de l'exploitation) ou collective (à l'échelle du territoire ou de la filière) de la production,

de maintien d'équilibres écologiques ou encore de préservation d'espèces. Dans la thèse, nous nous intéressons plus spécifiquement à la conception de l'agro-écosystème dans son ensemble. Or ce qui est à concevoir, mais aussi les objectifs de la gestion, les moyens et les collectifs à mettre en place pour les atteindre ne sont pas définis préalablement. Ceci nécessite donc d'adopter un raisonnement de conception innovante plutôt que de conception réglée (Le Masson *et al.* 2006). Deuxièmement, les principes de la conception innovante peuvent être particulièrement adaptés aux situations de grande incertitude telles que celles caractérisant les écosystèmes, notamment sur les valeurs, les objectifs à atteindre ou encore les critères d'évaluation à mettre en place. Ainsi la conception innovante permet d'explorer les services écosystémiques à gérer ou d'imaginer une diversité de trajectoires possibles pour l'agro-écosystème. Troisièmement, la conception est un support d'apprentissage. C'est une activité de production de connaissances guidée par l'action. Elle peut donc être intéressante pour intégrer des connaissances de disciplines (écologie, agronomie, sciences économiques et sociales) et de natures (empiriques ou scientifiques) différentes. Enfin, la conception nous semble intéressante pour amener des acteurs dont les avis et intérêts peuvent diverger à échanger leurs points de vue et à construire collectivement des configurations nouvelles de l'agro-écosystème. Pour toutes ces raisons, il nous semble utile d'outiller les processus de conception des agro-écosystèmes.

b. En quoi la conception diffère-t-elle des processus de modélisation et de décision ?

En quoi une approche par la conception diffère-t-elle des approches de modélisation et d'optimisation, qui sont actuellement les principales approches retenues dans la littérature sur les services écosystémiques et sur les socio-écosystèmes? Il nous semble utile dans un premier temps de caractériser un raisonnement de conception par rapport aux autres types de raisonnement, et d'en identifier les apports par rapport à notre objet, l'agro-écosystème. Pour cela, nous nous appuyons sur le formalisme proposé par Hatchuel *et al.* (2013). Ces auteurs introduisent la notion de « fonction générative » pour les comparer. La fonction générative désigne toute transformation dans laquelle l'*output* contient au moins un objet qui était inconnu dans l'*input* de la fonction (Hatchuel *et al.* 2011) et qui permet d'augmenter la connaissance.

La fonction générative de la modélisation

La modélisation, outil incontournable de l'écologie, suppose que l'objet que l'on cherche à modéliser existe et que l'objectif est d'en comprendre le fonctionnement. Il s'agit donc de concevoir des modèles qui rendent compte le plus fidèlement possible de ce fonctionnement.

A titre d'illustration, et en reprenant le formalisme de Hatchuel *et al.* (2013) :

- soit X_i un objet i , défini par le nom « X_i » et par un ensemble de propriétés. Citons par exemple un écosystème ;
- soit $K_i(X_i)$ une modélisation qui en est proposée, c'est-à-dire des connaissances établies sur cet objet et sur ses propriétés. Nous pouvons citer comme exemple la modélisation des écosystèmes à partir des flux de matière et d'énergie introduite par Odum (1971), évoquée dans la Partie 1 de la thèse ;
- Et soit $K(X_i)$ l'ensemble des modèles de tous les X_i .

Selon Hatchuel *et al.* (2013), la modélisation suppose que l'objet est observable et que le modélisateur est indépendant de cet objet. De plus, un modèle doit vérifier deux propriétés pour être validé : il doit être cohérent (non contradictoire, non redondant) et complet (il doit suffisamment pouvoir expliquer une observation). La modélisation vise à réduire les anomalies de connaissances : c'est-à-dire que si le modèle ne prédit pas certaines observations observées ou s'il prédit des choses jamais observées, le scientifique va poser des hypothèses nouvelles. Par exemple, il peut faire l'hypothèse qu'il existe un objet X_x , observable non encore observé, qui pourrait réduire les anomalies s'il vérifie certaines propriétés. La modélisation peut alors donner lieu à un nouveau modèle $K_x(X_x)$ plus cohérent et plus complet que le modèle initial, et peut aussi conduire à réviser les connaissances initiales. Nous nommons, toujours selon Hatchuel, Reich *et al.* (2013), Y une observation remettant en cause la validité du modèle $K(X_i)$ et $K'(X_i)$ les nouvelles connaissances créées grâce au nouveau modèle.

Pour suivre notre exemple, suite aux travaux d'Odum, divers chercheurs ont souligné le fait que le modèle d'écosystème basé sur les flux et non spatialement explicite n'était pas complet : il n'était pas suffisamment explicatif du fonctionnement des écosystèmes, et certaines observations mettaient en lumière cette incomplétude. C'est le cas par exemple des observations sur les dynamiques spatiales de populations impliquées dans la production et la régulation de flux (voir les théories de dispersion/extinction et de métapopulations). Y signifie dans notre cas qu'il faut lever l'hypothèse de l'homogénéité du milieu et qu'il faut prendre en compte la dimension spatiale de l'écosystème.

Par conséquent, selon Hatchuel *et al.* (2013), la fonction générative G_m de la modélisation est:

$G_m(K(X_i), Y) \Rightarrow [K(X_x), K'(X_i)]$, avec dans notre exemple :

- $K(X_i)$: le modèle d'écosystème non spatialement explicite
- Y : les observations montrant l'importance de la dynamique spatiale des populations

- $K(X_x)$ la nouvelle représentation des écosystèmes spatialement explicite
- $K'(X_j)$ les nouvelles connaissances produites grâce à ce nouveau modèle sur les mosaïques paysagères, les métapopulations, etc.

Cela signifie qu'à partir d'un modèle initial et d'observations qui remettent en cause sa validité, il est possible de générer de nouvelles hypothèses, donc un nouveau modèle, et de produire des connaissances supplémentaires utiles à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème. La modélisation aide donc à progresser sur la connaissance d'un objet. C'est parce que l'objet est supposé préexister à la modélisation et être observable qu'il est possible de générer des modèles de plus en plus performants (Hatchuel *et al.* 2013). Par conséquent, si la modélisation vise à rendre compte du fonctionnement d'un système ou de faire des prédictions sur les conséquences de variation de paramètres, elle ne vise pas à transformer le système de départ. On retrouve ici la posture compréhensive des écologues que nous avons décrite dans la Partie 1 de la thèse.

La fonction générative de la décision basée sur l'optimisation

Avec l'introduction des services écosystémiques pour repenser la gestion des écosystèmes, les scientifiques changent de posture. Il ne s'agit plus seulement de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes, mais d'utiliser les modèles pour instruire des prises de décision de gestion. Dans la littérature sur la gestion des écosystèmes, la plupart des travaux de recherche mobilisent les théories de la décision et de l'optimisation. En effet, selon Power (2010), le cadre d'analyse des services écosystémiques est en général :

1. la mesure de la production de services écosystémiques ;
2. l'identification de la valeur monétaire de ces services ;
3. la conception d'outils de politiques publiques pour gérer les services écosystémiques.

Ce cadre d'analyse suppose que les écosystèmes préexistent et sont observables, donc modélisables. A partir des modèles, on suppose qu'il est possible d'identifier et de quantifier un certain nombre de services. Ensuite, il s'agit de définir les valeurs des services avant de prendre des décisions quant à leur gestion. Ces décisions seront prises en fonction des critères de valeur définis ; on est donc bien dans une posture de décision-optimisation, à partir de représentations exprimées à un moment donné des écosystèmes et des services qu'ils produisent, mais aussi des valeurs que ces services peuvent avoir. De la même façon, les travaux sur la gestion des *common pool resources* ou des socio-écosystèmes mobilisent des approches de *problem-solving* qui s'appuient sur la théorie de la décision (Ostrom 1990; Anderies *et al.* 2007; Ostrom 2007). Ils supposent notamment que les biens à gérer en commun ont une valeur importante pour l'ensemble de la communauté.

Selon Hatchuel *et al.* (2013), la décision-optimisation vise à explorer un espace de décision très vaste à l'aide d'algorithmes, de manière à en évaluer les différentes solutions possibles et à sélectionner l'alternative optimale en fonction de critères de choix prédéfinis. Selon ces auteurs, le point de départ d'un processus de décision est constitué de trois éléments :

- $K(Xx)$ le modèle initial de l'écosystème ;
- $D(d_j)$ l'espace des décisions acceptables (en fonction des acteurs et des contraintes locales par exemple) ;
- $O(d_i)$ l'ensemble des critères pour désigner les paramètres optimaux.

La fonction générative Go de la décision-optimisation est donc : $Go [K(Xx), D(d_j), O(d_i)] \Rightarrow D^*(d_j)$,

avec $D^*(d_j)$ la décision optimale trouvée en fonction de la représentation initiale de l'écosystème, ainsi que des critères d'acceptabilité et d'optimalité que les acteurs se sont fixés initialement.

$D^*(d_j) \in D(d_j)$ et $O(D^*(d_j))$ est vérifiée : cela signifie que la décision optimale est acceptable par les acteurs et qu'elle répond aux critères initiaux d'optimalité.

Hatchuel *et al.* (2013) précisent que les deux fonctions génératives Gm et Go produisent des connaissances nouvelles, mais de nature différente. La modélisation peut introduire de nouveaux objets Xx dont on fait l'hypothèse qu'ils existent même s'ils n'ont pas été encore observés, tandis que l'optimisation produit des connaissances sur la structure de $K(Xx)$, donc sur la représentation de l'écosystème, en fonction des critères d'optimisation fixés au départ. La décision suppose que les objets et les critères d'optimalité préexistent ; elle suppose donc que les valeurs sont données et connues initialement. C'est la décision optimale par rapport à un ensemble de solutions possibles qui est initialement inconnue.

On retrouve bien les trois étapes évoquées par Power (2010) sur la gestion des services écosystémiques : 1) les services sont listés puis mesurés, 2) leur valeur est évaluée, 3) des décisions sont prises sur leur gestion et les instruments politico-économiques adaptés.

Les spécificités de la conception par rapport à la modélisation et la décision

Toujours en mobilisant le formalisme introduit par Hatchuel *et al.* (2013), nous proposons d'explicitier ce que serait la conception d'un écosystème, et d'en souligner les différences avec les approches aujourd'hui adoptées dans la littérature.

Selon Hatchuel *et al.* (2013), la conception consiste à générer un objet Xx qui n'existe pas encore, et qui ne pourrait pas être créé simplement à partir d'objets et de connaissances existants. Une

différence avec la modélisation est que l'objet inconnu n'est pas supposé « observable », puisqu'il ne préexiste pas à la conception. En revanche Xx est « désirable », dans le sens où on lui assigne au moins une propriété désirable $P(Xx)$. $P(Xx)$ est une propriété nécessaire mais pas suffisante pour obtenir Xx . $[Xx, P(Xx)]$ est un concept : on ne le connaît pas et on ne peut pas l'observer ailleurs, mais on ne peut pas dire d'emblée s'il est réalisable ou non. Par exemple, « un paysage agricole favorable à l'outarde canepetière » était initialement un concept pour les écologues du CEBC, avec Xx le paysage agricole et $P(Xx)$ la propriété « favorable à l'outarde ». Les connaissances initiales $K(Xi)$ sur l'écologie de l'outarde et sur les différentes configurations de prairies ne permettaient pas de dire si $P(Xx)$ était vraie ou fausse. Il était donc nécessaire de spécifier le concept initial en lui donnant de nouveaux attributs, et de produire des connaissances nouvelles. Hatchuel et Weil (2009) soulignent en effet que la conception repose sur une expansion simultanée des connaissances et des concepts. L'expansion des connaissances signifie l'ajout de connaissances (soit existantes, mais qui n'étaient pas connues, soit nouvelles) ; l'expansion des concepts signifie l'identification de nouveaux concepts par l'ajout d'attributs (de propriétés P) nouveaux. Autrement dit, il convenait de réviser $[Xi, K(Xi)]$ en $[Xj, K(Xj)]$ différent de Xx .

Selon Hatchuel *et al.* (2013), la fonction générative G_c de la conception est la suivante :

$G_c [(K(Xi), P(Xx))] \Rightarrow [K'(Xj), K(Xx)]$, avec

- $K(Xi)$ l'ensemble des modèles des Xi connus au départ ;
- $P(Xx)$ une propriété désirable de Xx ;
- $K'(Xj)$ les connaissances créées par les nouveaux concepts ;
- $K(Xx)$ les connaissances produites sur l'objet désirable Xx .

La fonction générative G_c est telle que les propriétés de cohérence et de complétude soient vérifiées et que $(K(Xi) \cup K'(Xj) \cup K(Xx))$ détermine la réalisation de Xx et la vérification de $P(Xx)$, c'est-à-dire que l'ensemble des connaissances acquises rendent possible la réalisation et l'existence du concept.

Pour poursuivre notre exemple, si Xx est notre paysage agricole et $P(Xx)$ la propriété « favorable aux outardes », les écologues ont d'abord identifié de nouvelles propriétés pour les prairies, telles que la fauche tardive des prairies. On peut donc nommer $[Xj, K(Xj)]$ une prairie fauchée tardivement. Cette propriété n'était pas connue initialement, tout au moins localement par les agriculteurs ; elle a été introduite par les écologues lors du processus de conception. Il faut ensuite intégrer des connaissances de l'agronomie et de l'écologie pour évaluer la faisabilité et

l'acceptabilité d'un tel concept. La fauche tardive, notamment sur la luzerne, pose des problèmes économiques aux agriculteurs et nécessitent une compensation financière. Avec le projet de filière luzerne, une autre piste est explorée, celle d'augmenter les surfaces en luzerne et de piloter leur localisation. Cette propriété nouvelle peut aussi conférer de la valeur au paysage au plan écologique. Elle invite à réviser les modes de coordination de l'implantation de luzerne par les agriculteurs.

Ainsi l'analyse du cas, éclairée par ce formalisme, met en évidence que la modélisation d'un agro-écosystème ne suffit pas pour l'action. Il ne suffit pas non plus de trouver une décision optimale parmi des alternatives connues, mais bien de générer de nouvelles alternatives en mobilisant des connaissances variées et en les évaluant au prisme de différents critères. La modélisation met en évidence que le paysage peut être une source de richesse au plan écologique. L'approche par les services écosystémiques consisterait à en définir la valeur pour effectuer des choix entre différentes configurations de paysage identifiées. L'approche par la conception invite à générer de nouvelles configurations du paysage en fonction de ce qui a de la valeur. Or lorsque l'on considère l'agro-écosystème comme un objet de conception, il est justement difficile de définir ce qui est à concevoir, ce qui peut avoir de la valeur.

En économie, Georgescu-Roegen a justement travaillé à qualifier, dans un processus de production, ce qu'il fallait entretenir et gérer pour pouvoir produire, donc en quelque sorte ce qui avait de la valeur : il les nomme les « fonds » et les différencie des « flux » produits. En introduisant cette notion de fonds, Georgescu-Roegen critique la représentation classique en économie des processus de production comme des variations de stocks par l'intermédiaire des flux. Le fait de qualifier les fonds est ce qui va en permettre une prise en compte adaptée dans les processus économiques, mais ce qui nous intéresse plus particulièrement est que cela va aussi en permettre la conception. Nous nous appuyons donc sur travaux de Georgescu-Roegen pour travailler sur la conception des agro-écosystèmes, mais en allant plus loin, puisque notre propos est de dire que non seulement les fonds peuvent être entretenus, mais aussi conçus.

2. Un modèle pour qualifier l'objet de la conception et identifier le collectif à impliquer

a. Dépasser les limites du modèle « stock-flux » : les apports de Georgescu-Roegen

La critique du modèle « stock-flux »

Le modèle « stock-flux », utilisé par la plupart des économistes depuis que Fischer a modélisé en 1895 le capital comme un stock, est également à la base de la modélisation des systèmes dynamiques, qui elle-même a été utilisée pour la modélisation des écosystèmes, notamment par Odum (1971). C'est aussi le formalisme retenu par les *ecological economists*. Norgaard (2010) souligne :

« In an effort to communicate the delusion of economic growth and the essence of environmental sustainability, ecological economists helped advance the metaphor of nature as a fixed stock of capital that can sustain a limited flow of ecosystem services (Costanza and Daly, 1992; Jansson et al., 1994; Prugh et al., 1999). (...) The ecosystem service metaphor now blinds us to the complexity of natural systems, the ecological knowledge available to work with that complexity, and the amount of effort, or transactions costs, necessary to seriously and effectively engage with ecosystem management ».

Cette représentation amène à considérer l'écosystème comme un stock. Par conséquent, on se prive de la capacité à qualifier les processus de production de flux de matière et d'énergie caractérisant le fonctionnement des écosystèmes, notamment les processus de régulation propres aux écosystèmes.

A la fin des années 1960, l'économiste Georgescu-Roegen a introduit un nouveau modèle pour décrire les processus de production. Le modèle « fonds-flux », par différence avec le modèle « stock-flux » jusqu'alors utilisé par les économistes classiques, a été développé dans une première communication, « *Process in farming versus process in manufacturing* », à la Conference of the International Economic Association (Rome, 1965). Puis il a repris et généralisé ce modèle dans diverses publications, notamment « *Process analysis and the neoclassical theory of production* » parue en 1971. Pour présenter ce modèle et en comprendre les apports, rappelons que l'une des principales caractéristiques des travaux de Georgescu-Roegen est d'avoir introduit la loi d'entropie dans l'économie, de manière à rendre compte de ses fondations biophysiques.

En thermodynamique, la loi d'entropie signifie que, dans un système isolé, l'énergie évolue d'un état ordonné vers un état de désordre. L'entropie est une mesure de l'énergie dissipée d'un système isolé, distincte de l'énergie libre, qui elle est susceptible d'être transformée en travail

mécanique. Ainsi, en faisant appel à la loi d'entropie, Georgescu-Roegen insiste sur l'irréversibilité des changements qualitatifs ayant lieu dans l'univers :

« The material universe (...) continuously undergoes a qualitative change, actually a qualitative degradation of energy » (Georgescu-Roegen (1971), p. 129).

Il critique donc la représentation du processus économique comme un mouvement circulaire entre la production et la consommation, le marché étant considéré comme fonctionnant au gré des mouvements réversibles de l'offre et de la demande (Ferrari 2011). Georgescu-Roegen insiste sur le fait que le processus économique est unidirectionnel et irréversible. Ce dernier se traduit selon lui par des flux de matière et d'énergie liés au prélèvement de matières premières puisées dans l'environnement ayant une basse entropie, et à la production de déchets ayant une entropie élevée, créés simultanément et inévitablement avec les produits désirés :

« From the viewpoint of thermodynamics, matter-energy enters the economic process in a state of low entropy and comes out of it in a state of high entropy » (1976)(p. 54).

Ce point de vue a deux implications : tout d'abord le processus économique ne peut pas se maintenir indéfiniment dans un état stationnaire ; en effet le stock de capital ne peut pas être maintenu constant du fait de la dissipation de la matière dans le processus économique (Georgescu-Roegen 1976). Par ailleurs, l'idée d'un recyclage total de la matière est un mythe (Ferrari 2011).

Le modèle « fonds-flux » de Georgescu-Roegen

Les implications de la loi d'entropie sont transcrites dans la description du processus économique par le modèle « fonds-flux ». Ce modèle permet de rendre compte, d'une part, des changements qualitatifs qui s'opèrent dans la sphère de la production, et, d'autre part, des interdépendances qui existent entre l'environnement et la production (Ferrari 2011). Il s'agit d'une représentation analytique du processus de production, qui suppose en premier lieu d'établir une frontière à la fois spatiale et temporelle du processus de production. Ainsi, le processus est représenté par une séquence d'opérations ordonnées dans le temps, qui permet d'étudier la performance de l'organisation des opérations.

Georgescu-Roegen distingue d'une part les éléments qui sortent du processus dans le même état qu'ils y sont entrés, qu'il nomme les fonds, et d'autre part ceux qui entrent dans le processus et n'en sortent pas, ou qui sortent du processus et n'y sont jamais entrés, qu'il nomme les flux.

- Les fonds (capital, travail et terre) sont les agents de la production ou « facteurs de production » selon la terminologie classique en économie. Ils entrent et sortent du processus et, par conséquent, sont à la fois *inputs* et *outputs*. Ils ne sont pas consommés (incorporés aux produits) au cours du processus mais ont pour fonction de produire des services. Un fonds est considéré comme un élément constant dans le processus tant du point de vue de la qualité que de la quantité.
- Les flux, par différence avec les fonds, sont soit des *inputs* soit des *outputs*, mais jamais les deux à la fois. Ils sont transformés par les fonds. Les flux entrants sont les éléments qui après être entrés dans le processus sont assimilés ; ce sont les ressources naturelles et les biens intermédiaires provenant d'autres processus de production. Les flux sortants sont les produits fabriqués et les déchets.

Par exemple, dans le cas d'un processus de production de chaussures, les ouvriers, les machines et le terrain sont des fonds, alors que le cuir et l'énergie nécessaires à la production, ainsi que les chaussures et les déchets produits, sont des flux. Tout processus de production nécessite une combinaison particulière de flux et de fonds, dont les dimensions sont d'ailleurs distinctes : la quantité de services fournis par les fonds s'exprime par la relation: (quantité en unité physique) x (unité de temps). Par exemple, dans une usine qui emploie 10 ouvriers sur une durée de 8h, le total des services rendus par les employés est égal à 80 hommes-heure. La quantité de flux, elle, est exprimée en unités physiques de l'élément considéré (tonnes, litres...) par unité de temps.

Pour Georgescu-Roegen, la confusion entre les notions de stock et de fonds constitue le « péché originel » de l'économie *mainstream* (Vittucci Marzetti 2009). Il définit pour sa part un flux ainsi : *"a stock spread out over an interval of time"* (Georgescu-Roegen (1971) p. 223). En effet, un stock diminue ou augmente de manière instantanée en fonction des ajouts et des prélèvements effectués ; il est donc modifié par des flux. Un stock a généralement une certaine valeur à un moment donné. Un fonds, lui, est supposé avoir une valeur constante et n'est pas échangé sur un marché au même titre que des flux. Les fonds et les flux ne peuvent donc pas être substitués entre eux ; ils sont au contraire complémentaires.

Georgescu-Roegen a ainsi proposé une grille d'analyse originale du processus de production à partir d'une nouvelle formulation de la fonction de production, qui permet une différenciation qualitative des éléments participant à la production. La relation de complémentarité entre fonds et flux souligne le fait que les décisions économiques sont plus complexes que la combinaison des facteurs de production (Vittucci Marzetti 2009). Georgescu-Roegen s'inscrit donc en faux contre les économistes utilisant des fonctions de production de type Cobb-Douglas stipulant que le

capital peut substituer des ressources (Daly 1995). Le modèle « fonds-flux » permet de décrire la technologie utilisée dans le processus de production considéré (Ferrari 2011). Le fait de considérer le temps comme explicite (un processus a un début et une fin) permet par ailleurs de penser l'amélioration des modes de coordination et d'interaction entre les fonds (Vittucci Marzetti 2009).

Le degré de précision dans la qualification des éléments constitutifs des systèmes de production apporté par le modèle « fonds-flux » nous semble indispensable lorsqu'on les aborde sous l'angle de leur conception. Cependant Georgescu-Roegen fait l'hypothèse que les fonds sont constants, *i.e.* que leur efficacité est maintenue au cours du processus de production, ce qui, selon lui, lui permet de décrire les relations physiques qui lient les flux entre eux. Cette hypothèse, qu'il considèrerait déjà lui-même comme « héroïque », a par la suite été critiquée par certains économistes (Vittucci Marzetti 2009). Du point de vue de la conception, l'intérêt de qualifier les fonds est précisément de pouvoir nommer, rendre visible des éléments, de disposer d'une nouvelle structure de connaissances, pour pouvoir ensuite les faire évoluer, les transformer, voire créer de nouveaux fonds. Georgescu-Roegen considère les fonds comme connus et donnés, or ils peuvent justement constituer le point de départ d'un processus de conception (Le Masson *et al.* 2010).

b. Le modèle « fonds écologique, sous-jacent et inconnu commun »

Initier le processus de conception : du sous-jacent au fonds écologique

Nous proposons de mobiliser le modèle « fonds-flux » proposé par Georgescu-Roegen qui permet de décrire plus précisément le fonctionnement des écosystèmes que le modèle « stock-flux ». Si l'on transpose ce modèle aux écosystèmes, le fonds constitue en quelque sorte le « facteur de production » de flux écologiques. Il est donc doté d'un ensemble de propriétés qui rendent possibles des interactions et des régulations écologiques. Nous proposons de nommer « **fonds écologique** » une entité biophysique constituant le siège de régulations écologiques que l'on cherche à gérer. Pour déterminer le fonds écologique, il faut au préalable identifier les régulations à gérer : nous nommons le « **sous-jacent** » la propriété qui permet d'identifier le fonds écologique et qui lui donne sa valeur. Le sous-jacent est un modèle conceptuel de régulations écologiques.

Par exemple, les savoirs et modèles de l'écologie nous renseignent sur ce qui est critique en ce qui concerne le maintien de la biodiversité et la préservation d'un certain nombre de régulations écologiques : il s'agit notamment de l'hétérogénéité du paysage (Nichols *et al.* 1998; Benton *et al.*

2003). C'est cette propriété qui donne au paysage de la valeur et qui en fait un fonds écologique : grâce à l'hétérogénéité, un paysage peut générer des régulations écologiques et des flux multiples.

Le fonds écologique comme inconnu commun

Par différence avec l'approche de Georgescu-Roegen et avec celles de modélisation et de décision, nous ne considérons pas le sous-jacent et le fonds écologique comme donnés et à entretenir, nous les considérons comme le point de départ d'un processus de conception. Le sous-jacent est en effet une propriété nécessaire mais pas suffisante pour la conception du fonds écologique.

Pour poursuivre notre exemple, nous ne supposons pas qu'il n'existe qu'une seule forme d'hétérogénéité ou que l'ensemble des formes d'hétérogénéités possibles soit connu. De nombreux choix restent à faire, notamment sur les éléments sur lesquels jouer pour obtenir cette hétérogénéité : par exemple si l'on est dans un milieu agricole, choisit-on de morceler les parcelles, de jouer sur les assolements, d'introduire des éléments pérennes (arbres, haies...) ou semi-pérennes, etc. ? Nous considérons le paysage comme un inconnu devant faire l'objet d'une conception. Pour reprendre le formalisme de Hatchuel *et al.* (2013), nous nommons X le paysage en tant que fonds écologique à concevoir. Les parties prenantes de la conception peuvent apporter des propriétés $P(X)$ qu'ils considèrent comme souhaitables. La conception peut faire intervenir un ensemble de connaissances variées, que ce soit des connaissances en écologie ou en agronomie, scientifiques ou empiriques, mais aussi des critères de sélection et d'évaluation multiples. Le processus de conception consiste à combiner des propriétés $P(X)$ considérées comme souhaitables par les parties prenantes de la conception.

Le sous-jacent va permettre de déterminer le fonds écologique en tant que point de départ d'un processus de conception collectif : en effet, pour être acceptables, les propriétés $P(X)$ doivent être proposées et/ou validées par les divers acteurs concernés. Ainsi, la détermination du sous-jacent et du fonds écologique va indiquer le périmètre de ce qui est à gérer dans l'agro-écosystème, ainsi que le collectif à impliquer dans la conception. Ce périmètre et ce collectif vont d'ailleurs probablement évoluer au cours de la conception ; ils seront redimensionnés par l'ajout d'attributs nouveaux (les expansions). Le fait de ne pas considérer le fonds écologique comme donné mais comme un objet à concevoir collectivement est une étape indispensable à la conception ; nous qualifions cet objet l'« **inconnu commun** », selon la formule introduite par Pascal Le Masson et Benoit Weil (2013) et en référence au bien commun. L'inconnu commun n'est support d'action collective que parce qu'il est considéré comme un objet à concevoir.

L'inconnu commun pour résoudre une situation de blocage

Dans le cas de la plaine de Niort, le fonds écologique est le paysage et le sous-jacent est le maillage des prairies pour avoir une distance entre elles satisfaisante pour la dispersion des insectes dont se nourrit l'outarde. Deux acteurs sont en présence et attribuent à la prairie des propriétés initialement contradictoires : les professionnels du monde agricole souhaitent que les prairies soient productives en fourrage, et les écologues les pensent comme des habitats écologiques. *A priori* ces deux propriétés semblent incompatibles. C'est ce qui caractérise la situation initiale de divergence, qui peut mener à un blocage de l'action collective, voire à un conflit entre ces deux acteurs.

Nous proposons de compléter notre modèle en incluant cette question de la divergence entre deux parties prenantes des agro-écosystèmes.

- Soit $P_1(X)$ la propriété de l'agro-écosystème souhaitée par l'acteur A, doté d'une base de connaissances K_A
- Et $P_2(X)$ la propriété de l'agro-écosystème souhaitée par l'acteur B, doté d'une base de connaissances K_B

Pour chacun des acteurs, d'après leur base de connaissances respectives, les propriétés P_1 et P_2 sont contradictoires. En d'autres termes, l'ensemble (P_1, P_2) est faux pour les deux acteurs ; ils sont donc dans une situation de blocage. En général, lorsqu'on est dans un paradigme de décision, où l'identité des objets est considérée comme stable, on négocie un compromis entre les deux positions, qui aboutit à $[\alpha P_1(X), \beta P_2(X)]$. Mais si on considère l'ensemble (P_1, P_2) comme un indécidable, on peut en faire le point de départ d'un processus de conception dans lequel sont impliquées les deux parties prenantes.

On peut alors utiliser la base de connaissances $K=K_1 \cup K_2 \cup \delta K$, δK étant de nouvelles connaissances apportées pour initier le processus de conception (voir Figure 25). L'objectif est alors d'identifier une nouvelle propriété P_3 grâce au δK , telle que l'ensemble (P_1, P_2, P_3) soit vrai.

Dans le cas empirique de la plaine de Niort, les écologues travaillent sur la gestion des adventices dans les luzernes sans utilisation d'herbicides chimiques. Leurs recherches tendent à montrer que si une parcelle est envahie par les adventices en première année, la gestion des coupes de luzerne peut aider la culture à reprendre le dessus pour les années suivantes. Ces nouvelles connaissances (δK) sur les liens entre gestion des coupes de luzerne et gestion de l'envahissement par les adventices peut permettre d'identifier une propriété P_3 concernant les dates de fauches, qui rende P_1 et P_2 compatibles.

Dans les espaces de conception respectifs des acteurs A et B, la prairie n'est pas un inconnu : chaque acteur lui attribue un certain nombre de propriétés tirées de leur base de connaissances. Par exemple, les agriculteurs lui attribuent des propriétés plutôt négatives (elle n'est pas rentable, etc.) et les naturalistes lui associent des propriétés *a priori* incompatibles avec la production agricole (habitat écologique à ne pas perturber). Cependant la prairie devient un inconnu à partir du moment où on lui attribue un ensemble de propriétés initialement contradictoires et qu'on ne considère pas que les concilier est « impossible », mais « indécidable », *i.e.* avec la base de connaissances dont on dispose, on ne peut pas dire si c'est vrai ou faux. La prairie change de statut en passant d'un objet connu à un objet inconnu avec le lancement du processus de conception commun : si la prairie semble connue lorsqu'elle est considérée séparément par chacun des acteurs, elle ne devient indécidable que si elle est commune, c'est-à-dire que si l'on considère qu'elle peut avoir au moins deux propriétés *a priori* contradictoires, que l'on peut mobiliser l'ensemble des ressources (connaissances), que l'on peut en créer de nouvelles, et que l'objet peut s'étendre au-delà des formes connues dans chacun des espaces de conception initialement disjoints. Ainsi, c'est parce que l'on montre la possibilité d'ouvrir un espace commun de conception que l'on peut sortir d'une situation d'impasse.

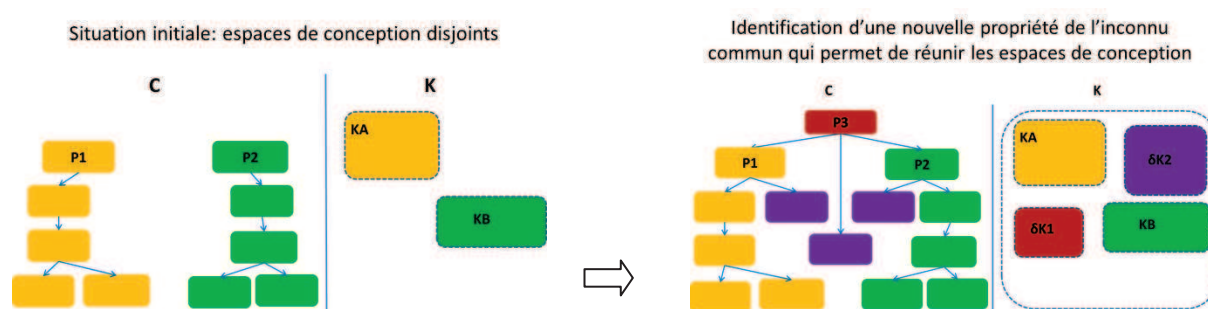


Figure 25 : Représentation de la façon dont un inconnu commun permet de réunir des espaces de conception initialement disjoints

A gauche, situation initiale avec les espaces de conception disjoints. A droite, la nouvelle propriété P3 est introduite grâce à $\delta K1$ (en rouge). Elle permet de générer de nouveaux concepts (en violet) qui eux-mêmes permettent de générer de nouvelles connaissances $\delta K2$.

Dans le cas de la plaine de Niort, la prairie, si elle est considérée comme un inconnu commun devient une solution potentiellement acceptable par l'ensemble des acteurs. Or la prairie était un élément du sous-jacent. Par conséquent, le fonds écologique ne pourra faire l'objet d'une conception collective que si le sous-jacent identifié introduit un inconnu commun.

Le Tableau 8 récapitule les termes introduits dans le modèle théorique que nous proposons pour initier un processus de conception d'un agro-écosystème.

Sous-jacent	Propriété essentielle pour assurer certaines régulations critiques du fonds écologique
Fonds écologique	Entité biophysique que le sous-jacent désigne comme étant le siège de régulations écologiques à gérer
Inconnu commun	Le fonds écologique n'est pas totalement déterminé par le sous-jacent : il doit faire l'objet d'une conception collective lors de laquelle lui seront attribués des attributs existants ou nouveaux, acceptables par les acteurs de l'agro-écosystème

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des termes introduits dans le modèle

La présentation de notre modèle théorique a permis d'identifier ce qui pouvait faire l'objet de la conception. Nous allons voir à présent ses implications sur l'identification du collectif à impliquer dans le processus de conception. Pour cela, nous mobilisons à nouveau les propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance que nous avons évoquées en Partie 1 au sujet des écosystèmes.

L'impact des propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance des fonds écologiques sur le collectif de conception

Un fonds écologique est identifié en fonction d'un certain nombre de régulations et de flux. Mais il peut permettre ensuite de rendre compte d'autres régulations que celles pour lesquelles il a été identifié au départ. De plus, désigner un fonds et identifier un sous-jacent ne préjugent pas des solutions à mettre en œuvre ; différentes solutions peuvent être envisagées en fonction des contraintes locales, du système social concerné ; elles peuvent aussi être inventées. Nous avons vu précédemment que pour répondre au sous-jacent d'« hétérogénéité », on pouvait envisager de multiples solutions possibles. Cela implique que les fonds écologiques ne sont pas déterministes, que ce soit par rapport aux flux produits ou par rapport aux solutions mises en œuvre. Par ailleurs, l'identification d'un sous-jacent va conditionner l'ensemble du processus de conception. Si par exemple le sous-jacent est l'hétérogénéité du paysage, cette propriété va orienter les choix retenus par la suite. Le sous-jacent introduit donc une propriété de non-indépendance entre les différentes étapes de conception.

La première conséquence des propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance des fonds écologiques est que le processus de conception nécessitera, au moins temporairement, un raisonnement de conception innovante (Le Masson *et al.* 2006). Il faut en effet pouvoir introduire de nouvelles propriétés du fonds, pour en explorer ensuite le potentiel. Ces nouvelles propriétés s'ajoutent à celles identifiées initialement par les acteurs et ne les excluent pas.

Une deuxième conséquence des propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance est que chaque conception est unique : elle doit être adaptée aux spécificités du fonds écologique, donc mobiliser des connaissances sur ces dernières. Par conséquent, il est nécessaire d'impliquer des acteurs locaux disposant de ces connaissances. Comme le soulignent Horlings et Marsden (2011),

“[agroecological systems explicitly] rely upon their local conditions as a means as well as a condition of production; and, not least to maintain and enhance diversity. The emphasis upon diversity means that it is rarely possible to generalize or to genericise sustainable production technologies”.

La question de l'implication d'acteurs locaux dans la conception d'innovations agricoles est étudiée par divers auteurs dans le champ de l'agronomie ou de la préservation de l'environnement. Warner (2008) mentionne la nécessaire hybridation des connaissances scientifiques générales et des connaissances empiriques locales, qui nécessite pour les chercheurs de prendre en compte les contraintes sociales, économiques et politiques. Cette analyse rejoint ici celle d'Ostrom sur les avantages d'une gestion des *common pool resources* (CPR) par les communautés locales. L'une des principales motivations de cette solution est en effet l'accès aux connaissances spécifiques aux CPR, nécessaires à la mise en œuvre de solutions de gestion adaptées.

Une troisième conséquence, que nous avons abordée dans la Partie 1 de la thèse, est liée au fait que les propriétés de non-déterminisme et de non-indépendance impliquent une impossibilité de découplage et de modularisation (Le Masson *et al.* 2013). Or dans les agro-écosystèmes céréaliers français, le fonds est généralement morcelé sur le plan de la propriété foncière, et réparti entre plusieurs exploitants. Or, la conception d'un fonds écologique ne peut être menée par un exploitant agricole seul. De même, alors qu'un nombre croissant d'acteurs hétérogènes souhaite aujourd'hui prendre part aux décisions sur la gestion de l'agro-écosystème, il est impossible de concevoir un fonds écologique selon un seul type de flux. En effet, non seulement la conception serait inadaptée, mais en plus elle ne serait pas acceptée par toutes les parties prenantes. De plus, les connaissances en écologie nécessaires à la modélisation du fonds doivent être complétées par des connaissances provenant d'autres disciplines, mais aussi empiriques, notamment pour penser

des moyens d'action efficaces et acceptables. Ainsi, l'implication d'un collectif capable d'identifier des flux pour déterminer le fonds écologique, de proposer de nouvelles propriétés du fonds écologique et de hiérarchiser des valeurs semble nécessaire pour garantir la progression d'un projet mais aussi son acceptabilité.

Le modèle théorique que nous avons introduit a donc une portée en termes de gouvernance : l'identification du fonds écologique et du sous-jacent, puis de l'inconnu commun, vont conditionner le périmètre des acteurs à impliquer. Une fois ces acteurs impliqués, il faudra maintenir cet inconnu de manière à ne pas retomber dans une situation d'impasse. Plus l'inconnu commun va nécessiter des propriétés en rupture, plus il faudra inclure des acteurs initialement éloignés et disposer de méthodes et d'outils de conception innovante. Le sous-jacent permet de définir des « métarègles » de conception et de gestion de l'agro-écosystème, qui vont influencer l'ensemble des règles de gestion, y compris au niveau individuel. Ces métarègles guident la coordination des acteurs au sujet des enjeux écologiques à prendre en compte.

La gestion implique une évaluation des actions menées. Or la question de l'évaluation du résultat de la conception menée sur l'agro-écosystème est difficile et cruciale. La théorie C-K nous donne déjà un certain nombre d'éléments pour évaluer un processus de conception innovante (voir présentation en introduction) : la variété des voies proposées, la valeur des concepts pour les parties prenantes du champ d'innovation, l'originalité des concepts proposés, et enfin la robustesse des concepts ainsi que des stratégies d'innovation associées. Par ailleurs, un enjeu important concernant l'agro-écosystème est la capacité d'évaluer les implications du processus de conception sur le long terme. En effet, la conception va influencer la trajectoire de l'agro-écosystème, c'est-à-dire la succession de ses différents états d'équilibre dynamique. Ainsi, une évaluation prédictive et/ou au cours du temps peut aider à corriger éventuellement les décisions prises sur la trajectoire de l'agro-écosystème. La notion de « robustesse du socio-écosystème », introduite par les chercheurs de l'Ecole de Bloomington (Anderies *et al.* 2004; Anderies *et al.* 2007; Ostrom 2007), c'est-à-dire sa capacité à résister aux perturbations (anthropiques ou naturelles), nous paraît être un critère particulièrement pertinent pour évaluer sa trajectoire.

c. Portée interprétative du modèle sur le cas empirique étudié

La recherche-intervention a visé à changer la perspective initiale des acteurs, qui estimaient que l'objet de leur négociation, la prairie, était connu. Notre analyse du cas nous a permis d'identifier le fonds écologique et le sous-jacent issus des modélisations des écologues, puis un inconnu commun qui pouvait constituer le point de départ d'un processus collectif de conception. Le raisonnement des écologues s'est appuyé sur la littérature générale en écologie mais aussi sur des

recherches menées dans la Zone Atelier sur le fonctionnement de l'agro-écosystème, avec comme entrée la conciliation de la production agricole et la préservation de l'outarde. Leur raisonnement a conduit à identifier comme fonds écologique le paysage et comme sous-jacent associé le maillage des prairies, considérées comme des « sources » de biodiversité et des lieux de régulation écologique. Notons que l'identification d'autres fonds écologiques ou d'autres sous-jacents aurait été possible si les écologues avaient mobilisé d'autres cadres théoriques que celui des métapopulations, en s'intéressant par exemple davantage aux réseaux trophiques, ou en adoptant une entrée par l'écologie du paysage. Un processus de conception est en effet largement conditionné par la nature des connaissances mobilisées.

L'atelier de conception innovante que nous avons mis en place dans le cadre de la recherche intervention a conduit l'ensemble des parties prenantes à considérer la prairie comme un inconnu, et à lui attribuer des propriétés nouvelles leur permettant d'être acceptables par chacun d'entre eux. Cela revenait à réinterroger son identité, c'est-à-dire ses modalités et ses valeurs possibles. En effet, les valeurs de la prairie ne concernent pas que l'outarde canepetière, mais aussi la préservation de la biodiversité au sens large et de la qualité de l'eau, ainsi que des intérêts économiques, agronomiques voire même sociaux pour les agriculteurs, tel qu'un renforcement des relations entre éleveurs et céréaliers dans le territoire. L'exploration collective a permis de revenir sur les hypothèses implicites de chacune des parties prenantes et de ré-ouvrir l'éventail des solutions possibles, afin d'en explorer de plus créatives que le fait de limiter la production agricole.

Le modèle permet également d'interpréter certaines difficultés rencontrées par les parties prenantes du projet. Par exemple, la coopérative ne souhaite pas augmenter trop rapidement les surfaces implantées en luzerne pour des raisons économiques et de difficulté d'organisation. Ses partenaires scientifiques et financiers s'inquiètent de cette situation. Or actuellement les négociations entre les parties prenantes du projet portent essentiellement sur les surfaces à planter en luzerne et sur le montant des financements nécessaires à la poursuite du projet. On ne parle plus de continuer à explorer des propriétés désirables de la prairie.

On peut cependant supposer que l'exploration de modalités possibles du projet initiée lors de l'atelier n'a pas été suffisante. L'atelier ayant été à la fois court et ponctuel (notamment par rapport à la mise en place de la méthode KCP dans une entreprise industrielle qui s'étend sur plusieurs mois), les acteurs n'ont pas vraiment eu le temps d'explorer l'inconnu. Il est possible

qu'ils n'aient pas encore trouvé les propriétés $P(X)$ qui permettent de surmonter l'antagonisme production agricole/environnement et qui satisfont l'ensemble des parties prenantes. Il aurait par exemple peut-être été nécessaire d'explorer de véritables innovations techniques qui auraient créé une rupture avec l'identité de la luzerne actuellement connue. Par ailleurs l'exploration lors de l'atelier a directement porté sur la luzerne, mais n'a pas spécialement traité de la pertinence de cette solution par rapport à d'autres, ni de sa soutenabilité. De nouvelles recherches en la matière sont probablement à poursuivre en ce sens.

Le cas empirique montre que le fait de maintenir une capacité de conception au cours du temps constitue un véritable défi pour les acteurs du territoire. Dans le cadre de notre recherche-intervention, nous n'avons organisé qu'un seul atelier de conception collective. La coopérative a conduit deux de ses employés à suivre une formation à la théorie C-K à l'Ecole des Mines de Paris. Cependant aucune méthode n'a été mise en place pour poursuivre l'effort de conception, probablement car il manquait un certain nombre de conditions : (i) nous n'avons pas poursuivi l'intervention dans le projet tout au long de la thèse, car nous avons jugé important de maintenir une approche théorique de la problématique de la thèse. Par conséquent nous n'avons pas choisi d'organiser de nouvel atelier de conception ; (ii) pour des raisons liées davantage aux parties prenantes du projet, de nouveaux enjeux de conception n'ont pas été identifiés et il n'a pas été envisagé de mettre en place de nouveaux ateliers de conception.

Aujourd'hui, la coopérative suit plutôt une voie classique de production de la luzerne pour la mise en place de la filière. Une explication possible est qu'elle n'a pas forcément pris conscience du fonds écologique et du sous-jacent à gérer. Or l'explicitation du fonds écologique et des sous-jacents par les écologues aux autres parties prenantes est une étape qui conditionne la capacité des acteurs du projet à collaborer. Elle nécessiterait peut-être d'être approfondie.

Chapitre II. Implications managériales : piloter la conception d'un agro-écosystème

1. Du bien commun à l'inconnu commun

Dans le cas de la plaine de Niort, à la différence des situations étudiées par Ostrom, il n'y avait initialement pas de « bien commun » identifié comme tel. On pourrait penser que l'outarde canepetière était le bien commun à préserver. Si on appliquait le cadre d'analyse des *common pool resources* d'Ostrom (1990), la plaine céréalière serait le système de ressources et il faudrait exclure ou réduire toute pratique contribuant à une dégradation du « stock » d'outardes, en l'occurrence les pratiques liées à la production agricole. C'était en quelque sorte une voie envisagée par les écologues dans la phase initiale de conception des mesures de conservation. Il est vrai que la situation ressemble à un dilemme des biens communs: la préservation de l'outarde répond aux critères (i) de problème de passager clandestin (le coût de la préservation de la biodiversité semble à un agriculteur supérieur au gain qu'il pourrait en attendre ; il est donc tenté de se comporter comme un passager clandestin et de ne pas y contribuer) ; (ii) de la dégradation possible de la ressource par les activités humaines et (iii) du besoin de coordination des actions en faveur de la préservation de l'outarde. Cependant l'outarde n'a pas pour les agriculteurs une valeur comparable à celle du produit de leur activité ; or dans la caractérisation de ce qu'elle nomme « *common pool resources* » (CPR), Ostrom précise que ces ressources doivent avoir une valeur reconnue par l'ensemble de la communauté qui le gère. Par conséquent, l'agro-écosystème de la plaine de Niort ne peut être considéré comme des CPR, et il est difficile d'envisager la mise en place d'une action auto-organisée autour de la préservation de l'outarde canepetière. C'est pourtant un objectif de la mise en place de la filière courte de luzerne visant à augmenter les surfaces en prairie.

L'étude empirique met en évidence que le cas de la gestion d'un agro-écosystème n'est pas équivalent à celui de CPR (voir Tableau 9). De manière générale, dans un agro-écosystème, le système de ressources est difficile à définir, notamment parce que les ressources à gérer en commun sont multiples, leurs flux peuvent être antagonistes et il n'existe pas de consensus *a priori* sur ceux à maximiser. Les valeurs des ressources sont souvent perçues différemment par les parties prenantes, ce qui peut créer des situations de conflits. Les limites physiques d'un agro-écosystème ne peuvent pas être définies de manière générale ; elles peuvent l'être en fonction des flux ciblés (ex. bassin versant si l'on cible la qualité de l'eau), ou encore en fonction de l'autorité de gestion que l'on prend en compte (ex. territoire de la coopérative). La communauté qui pourrait être chargée de concevoir les institutions adéquates est difficile à identifier puisque les

acteurs dépendants de l'agro-écosystème ont généralement des intérêts hétérogènes voire divergents.

Les nouvelles pratiques à mettre en œuvre pour préserver l'environnement ne sont pas toutes connues et celles proposées ne font pas toujours consensus. La méthode par essais-erreurs ou résolution de problème ne semble pas adaptée à la conception de nouvelles méthodes de gestion de l'agro-écosystème : d'une part, la connaissance fait défaut en ce qui concerne le fonctionnement des agro-écosystèmes. Il est difficile de mettre en place des expérimentations pour étudier des interactions aussi complexes, concernant des échelles spatiales et temporelles parfois très larges. D'autre part l'identité-même de l'agro-écosystème n'est pas stable au cours du temps. Elle peut être rapidement et fortement modifiée par les activités humaines : de nouvelles valeurs ou utilisations des produits de l'agro-écosystème sont sans cesse inventées ; on peut citer par exemple des innovations en ce qui concerne l'utilisation du chanvre à des matériaux de construction (Le Masson *et al.* 2012a) ou encore l'utilisation de colza pour les biocarburants. La résolution de problèmes dans laquelle le problème à traiter est défini au départ ne semble donc pas adaptée à ce type de situation.

Notre analyse mobilisant une approche de conception met en évidence que lorsque les acteurs cherchent à gérer un agro-écosystème, ils doivent passer d'une logique de bien commun à une logique d'inconnu commun : cela implique que le bien ne préexiste pas à l'action collective, le fonds écologique ne doit pas être considéré comme donné, mais à concevoir. Son identité n'est pas stable : les flux qu'il peut générer ne sont pas connus de manière exhaustive et il n'est pas délimité précisément. De plus, il n'existe pas de « collectif de gestion » de l'agro-écosystème, notamment car il n'y a pas *a priori* de consensus sur la valeur. Les acteurs de l'agro-écosystème sont en général plutôt indépendants les uns des autres et leurs intérêts par rapport à la gestion de l'agro-écosystème divergent souvent. Par ailleurs, la connaissance de l'agro-écosystème et des ressources qu'il peut générer est limitée ; l'exploration de l'inconnu commun va nécessiter que les acteurs formulent des propriétés souhaitables. Les actions de gestion à mettre au point seront de nature variée. La conception va devoir porter simultanément sur un ensemble de dimensions liées entre elles : le fonds écologique et le sous-jacent, les valeurs associées, le collectif de conception, les actions de gestion à mettre en place, et enfin les règles de gouvernance et le modèle économique pertinents.

	Gestion des <i>common pool resources</i> (CPR)	Conception et gestion d'un agro-écosystème
Objet de la gestion commune	Préexistantes à l'action collective, stables (stock)	Fonds écologique, à concevoir
	Un type de ressources communes ciblé	La liste des flux à gérer n'est pas exhaustive
	Système de ressources délimité	Le fonds écologique n'est pas délimité
Communauté	Communauté identifiée	Il n'existe pas de « collectif de gestion » de l'agro-écosystème
	Valeur des CPR reconnue ; le manque de consensus est un obstacle	Pas de consensus préalable sur la valeur (éventuellement conflit)
Connaissances	La connaissance sur les moyens de gestion des biens existe ou peut être produite par essai-erreur	Connaissances limitées sur l'agro-écosystème, ses ressources et ce qui est désirable.
	Le manque de connaissances sur le système de ressources est un obstacle	Des connaissances sont générées lors de la conception
Actions de gestion	Limitation du prélèvement et maintien de la capacité de régénération du système	Actions de nature variée, à déterminer
	Usages des CPR connus	Valeurs en partie connues au départ : nécessitent une exploration
Objet de la conception	Règles de gouvernance	Fonds écologique et sous-jacent, valeurs associées, actions de gestion, collectif, règles de gouvernance et modèle économique
Enjeux de gouvernance	Déterminer et faire accepter les règles de gouvernance adaptées	Faire émerger l'inconnu commun, puis mettre en place des règles de gouvernance du bien collectivement conçu

Tableau 9 : Les différences de caractéristiques entre *common pool resources* et agro-écosystèmes du point de vue de la conception et de la gestion

La colonne de gauche reprend les hypothèses sur les CPR listées dans le Tableau 7.

Le Tableau 9 met en évidence les difficultés auxquelles sont confrontés les acteurs en charge de la gestion d'un agro-écosystème par rapport aux situations de *common pool resources*. Comment mettre en place une gestion collective de l'agro-écosystème ? Peut-on l'initier sans instrument de marché ni régulation publique alors qu'il n'y a pas de bien commun reconnu comme tel par les parties prenantes de l'agro-écosystème ? Quels sont les enjeux de gouvernance associés ?

2. Enjeux de gouvernance et défis managériaux associés

Le cas des agro-écosystèmes soulève un certain nombre de difficultés que la littérature sur les biens communs n'évoque pas. Nous identifions quatre enjeux de gouvernance relatifs à ces difficultés.

- 1) Il n'existe pas *a priori* de consensus sur ce qui peut être géré en commun. Au contraire, les types de ressources et de services écosystémiques sont variés, de même que les valeurs que leur accordent les acteurs. Cette multiplicité des objectifs de gestion possibles et les divergences d'intérêts peuvent créer des situations conflictuelles entre les parties prenantes de l'agro-écosystème. Un premier enjeu de gouvernance est donc de surmonter les éventuels conflits, tout au moins les situations de blocage de l'innovation.
- 2) Il est difficile d'aborder la gestion des agro-écosystèmes de manière innovante : les acteurs, que ce soit les agriculteurs (micro-entreprises individuelles) ou les organisations professionnelles agricoles, sont distribués ; l'agriculture est soumise à de nombreux aléas peu maîtrisables tels que le climat ou la volatilité des prix du marché ; le prototypage et l'expérimentation sont difficiles étant donné les échelles de temps et d'espace auxquelles ont lieu les processus. Par conséquent, un second enjeu de gouvernance est d'inciter les acteurs à explorer des voies innovantes, à surmonter les verrouillages (Liebowitz and Margolis 1995) et à éviter les effets de fixation cognitifs (Smith *et al.* 1995; Agogué 2012).
- 3) Les règles de gouvernance à mettre en place ne portent pas que sur l'entretien d'un stock. Les actions de gestion peuvent être de nature variée. Le sous-jacent précise ce sur quoi doit porter en priorité la collaboration. Dans le cas de la plaine de Niort, il s'agit de la localisation des prairies. L'identification du sous-jacent garantissant le bon fonctionnement écologique de ce fonds va introduire des « métarègles » de conception et de gestion adaptées à cet agro-écosystème, qui vont également conditionner les règles de décision individuelle.
- 4) L'agro-écosystème étant dynamique et soumis à de nombreuses perturbations, dont certaines seront influencées par le processus de conception collective, il est important d'assurer un suivi à long terme de la trajectoire de l'agro-écosystème, donc de maintenir une cohésion et une implication des parties prenantes dans ce suivi.

Ces nouveaux enjeux de gouvernance posent des difficultés managériales aujourd'hui non évoquées dans la littérature sur la gestion des biens communs, et qui vont nécessiter la mise en place d'un pilotage spécifique. Nous allons à présent en souligner un certain nombre de caractéristiques.

a. Surmonter les situations de divergences et de conflits qui bloquent l'innovation

Dans le cas de la plaine de Niort, la proposition que nous avons étudiée pour surmonter la situation de blocage est celle d'engager un processus collectif de conception d'un inconnu commun. Un tel processus vise à surmonter les difficultés, et à mettre d'accord un ensemble d'acteurs aux intérêts divergents en les incitant à explorer ensemble des solutions « désirables ». Faire émerger l'inconnu commun permet d'ouvrir un espace de conception collective et de surmonter une situation de blocage. Un premier objectif managérial est donc de faire émerger l'inconnu commun. Un second objectif est de le faire reconnaître en tant qu'« inconnu commun » en initiant un processus de conception collective. C'est en effet ce processus qui permettra l'élaboration de solutions désirables collectivement, donc de valeurs collectives.

Faire émerger l'inconnu commun consiste à identifier le fonds écologique et le sous-jacent. D'après notre étude empirique, l'identification du fonds écologique et du sous-jacent nécessite des connaissances scientifiques approfondies, mobilisant à la fois le front de science général et des informations sur les spécificités de l'agro-écosystème. Dire que le fonds écologique et le sous-jacent sont un inconnu commun consiste à inviter chaque partie prenante concernée à proposer des propriétés $P(X)$ du fonds écologique, ainsi qu'à participer à l'évaluation et à la sélection de ces propositions. Les propriétés $P(X)$ doivent en effet respecter le sous-jacent.

Dans le cas étudié, la reconnaissance par les acteurs de l'inconnu commun soulève effectivement des difficultés. Le fonds écologique et le sous-jacent ont été identifiés par les écologues grâce à leur capacité à produire des connaissances sur l'agro-écosystème. Mais le passage du fonds écologique à l'inconnu commun est particulièrement difficile à mettre en œuvre : d'une part les écologues privilégient grandement la solution qui leur paraît la plus optimale, l'implantation de luzerne. Or, si les marges de manœuvre existent sur les formes de luzerne possibles -nous l'avons vu lors de l'atelier de conception, elles sont restreintes par rapport à l'exploration d'un ensemble de cultures semi-pérennes possibles, voire d'autres types de solutions qui pourraient respecter le sous-jacent. On pourrait en effet imaginer, par exemple, la mise en place d'une culture biologique sans labour pour respecter les propriétés de non-perturbation du sol et de non-utilisation de pesticides propres aux luzernes. D'autre part, la coopérative, qui a des objectifs de rentabilité économique et de satisfaction de ses adhérents, est très prudente sur la mise en place d'itinéraires techniques innovants (donc potentiellement risqués) visant à concilier production agricole et environnement. Par ailleurs, le fait que la coopérative maintienne son choix d'une production intensive de luzerne révèle peut-être le fait qu'elle n'a pas saisi précisément la nature du fonds écologique permettant de générer des flux de biodiversité et de qualité de l'eau, ni les propriétés

de la luzerne permettant de respecter le sous-jacent. La compréhension de ces phénomènes est particulièrement complexe et nécessite sans doute une explicitation plus approfondie par les écologues.

b. Surmonter les verrouillages et les effets de fixation

Faire émerger l'inconnu commun est déjà difficile à mettre en œuvre ; explorer de façon innovante l'inconnu commun est également problématique, car il nécessite d'envisager d'autres solutions de gestion que celles qui sont connues. Pour soutenir les acteurs dans l'exploration de solutions innovantes, donc surmonter les verrouillages et les effets de fixation, un enjeu managérial est de soutenir la capacité de conception des acteurs. Il faut d'une part que les acteurs se mettent dans une posture de conception, donc abordent le fonds écologique comme un inconnu commun et non comme un bien commun. D'autre part il est nécessaire de soutenir le processus de conception, qui nécessite des compétences et des méthodes adaptées.

La capacité à identifier des opportunités communes requiert de développer la capacité de conception innovante des acteurs, *i.e.* leur capacité à se projeter vers le « désirable » non connu (Le Masson and Weil 2013). Il s'agit de stimuler l'exploration de l'espace des « désirables » et de solutions nouvelles, mais aussi d'explorer la façon de déployer ces solutions de manière soutenable pour les acteurs. L'identification de nouvelles modalités de gestion de l'agro-écosystème peut nécessiter l'intervention d'experts variés, éventuellement extérieurs au projet ; les frontières du collectif ne sont pas figées. Une première action de pilotage à mettre en œuvre est donc d'impliquer les parties prenantes adaptées pour constituer un collectif de conception. L'identification du fonds va conditionner à la fois le périmètre à considérer et le collectif à impliquer ; elle va déterminer quels sont les acteurs directement concernés par les propriétés qui sont attribuées à ce fonds, et/ou quels sont ceux susceptibles d'apporter des connaissances ou des propositions nouvelles. Il est nécessaire d'identifier les bons experts, quitte à en solliciter à l'extérieur du périmètre du collectif, mais aussi d'organiser l'intégration de connaissances variées. En effet l'exploration de l'inconnu commun va nécessiter des savoirs dans des disciplines multiples (écologie, agronomie, sciences économiques et sociales) et qui peuvent être de nature variée (scientifique, empirique, technique...).

Une seconde action de pilotage est l'élaboration et la mise en œuvre d'un certain nombre de règles et de méthodes adaptées à ces enjeux d'innovation. Sur cet aspect, la littérature propose des pistes intéressantes. Le Masson, Weil et al. (2012b) mettent en évidence de l'existence de ce qu'ils nomment « règles de déverrouillage » (*unlocking rules*) pour susciter l'innovation à l'échelle des régimes sociotechniques, souvent caractérisés par des logiques de « verrouillage ». Ces règles

de déverrouillage rendent possible des processus qui se distinguent de ceux décrits dans la littérature évolutionniste, dans laquelle les règles d'un régime sociotechnique seraient d'abord élargies, relâchées, affaiblies avant d'être progressivement substituées par des règles plus robustes : les règles de déverrouillage permettent de surmonter les verrouillages et de générer une multiplicité de voies alternatives. Le Masson *et al.* (2012b) s'appuient sur la distinction introduite par Geels (2004) entre les « règles de régulation » (règles formelles explicites qui contraignent le comportement et régulent les interactions : *e.g.* la régulation publique), et les « règles normatives » (règles qui confèrent des valeurs, normes, attentes et responsabilités et qui sont internalisées lors de processus de socialisation). Ils identifient trois types de règles de déverrouillage : (i) les règles de régulation permettant un déverrouillage (*unlocking regulation rules*), par exemple les accords volontaires (Aggeri 1999) par lesquels les pouvoirs publics incitent les acteurs à trouver des solutions innovantes ; (ii) les règles normatives de déverrouillage (*unlocking normative rules*), par exemple présentes dans les milieux artistiques où les artistes se critiquent, se provoquent, etc. ; (iii) les règles de déverrouillage cognitif (*unlocking cognitive rules*), par exemple celles enseignées par les professeurs Itten (1975) ou Klee (1966) au Bauhaus (Le Masson *et al.* 2013), ou encore celles tirées des théories et méthodes de la conception innovante (Hatchuel *et al.* 2011). Les règles de déverrouillage sont mises en œuvre pour éviter les effets de fixation vers les solutions connues et pour faciliter un apprentissage collectif destiné à soutenir l'innovation. De telles règles seraient particulièrement intéressantes à identifier et mettre en œuvre dans le secteur agricole, qui comme cela a déjà été démontré dans la littérature (Cowan and Gunby 1996; Meynard 2010) fait l'objet de verrouillages importants (voir aussi la Partie 1 de la thèse).

Concernant les méthodes de conception collective, la littérature en mentionne un certain nombre qui peuvent être mobilisées dans le secteur agricole. Dans le cas empirique, nous avons appliqué la méthode KCP dont nous avons tiré un certain nombre d'enseignements. Il existe d'autres méthodes de conception collective qui peuvent être mobilisées dans le champ de l'agronomie ; nous avons engagé à ce sujet un travail comparatif de trois méthodes, KCP, ComMod et le Rami fourrager avec des collègues de l'INRA (Berthet *et al.* 2012a).

c. Mettre en place des règles de gouvernance du fonds écologique

Le sous-jacent précise ce sur quoi doit porter en priorité la collaboration. Dans le cas de la plaine de Niort, il s'agit de la localisation des prairies. Or comment conduire les agriculteurs à se coordonner pour piloter collectivement la distribution des prairies, sachant qu'ils prennent leurs décisions sur l'assolement de manière individuelle et indépendante ? De manière plus générale, comment sensibiliser des acteurs qui n'ont pas l'habitude de coopérer ou de se coordonner à

l'intérêt de telles interactions ? Une voie explorée lors de l'atelier a été de rendre visibles les interdépendances entre les acteurs de l'agro-écosystème, soit par l'intermédiaire de paramètres collectifs de conception de la luzerne (coordination des dates de fauche, pilotage de la localisation des prairies), soit en identifiant des valeurs potentielles d'une gestion collective de la luzerne. Par exemple, la luzerne ayant un intérêt pour l'alimentation des abeilles donc pour les services de pollinisation et de production de miel, cette valeur révèle une interdépendance entre agriculteurs et apiculteurs liée à la localisation et à la gestion de la luzerne.

Notons que lorsque les acteurs réfléchissent aux règles de gouvernance nécessaires à la mise en œuvre des solutions collectivement explorées et sélectionnées, la situation devient semblable à celles étudiées par Ostrom. Le cas des agro-écosystèmes rend compte, comme nous l'avons souligné dans la Partie 2 de la thèse, de situations plus générales que celles des *common pool resources* et soulève des problèmes managériaux non évoqués dans cette littérature.

d. Assurer le suivi collectif et à long terme de la trajectoire de l'agro-écosystème

Un agro-écosystème est dynamique : comme tout écosystème, il évolue en fonctions des perturbations naturelles ou anthropiques ; de plus il est modifié au cours du temps par les activités humaines. On ne peut considérer qu'il est à un équilibre stable, mais plutôt qu'il suit une trajectoire. La conception collective de l'agro-écosystème oriente cette trajectoire ; ce qui a au moins deux implications : la première est qu'une fois le choix d'une option fait parmi les propriétés $P(X)$ proposées, il faut vérifier que le sous-jacent est bien respecté dans le temps. Dans le cas étudié, cela reviendrait à suivre la qualité écologique du paysage dans lequel le maillage des prairies serait effectué : quels résultats pour la biodiversité, pour la qualité de l'eau... ? Ce suivi doit impliquer les parties prenantes qui ont contribué au processus de conception. L'élaboration d'outils de suivi multicritères et dans le temps long de cette trajectoire sera nécessaire. Il y a un enjeu à ce qu'ils soient utilisables par une diversité d'acteurs. La seconde implication est que si l'on met en évidence de nouvelles régulations écologiques, il faudra probablement relancer le processus de conception. Par conséquent la conception de l'agro-écosystème ne peut être réalisée de manière ponctuelle : elle nécessite d'être maintenue dans le temps. Il faut donc imaginer des formes organisationnelles susceptibles de faire perdurer la posture de conception des acteurs de l'agro-écosystème.

Le Tableau 10 récapitule les enjeux de gouvernance et managériaux identifiés pour la conception d'un agro-écosystème.

Difficulté identifiée	Enjeu de gouvernance	Enjeu managérial	Solution managériale proposée
Pas de consensus initial sur ce qu'il y a à gérer en commun	Surmonter les divergences et conflits	Faire émerger l'inconnu commun	Identifier le fonds écologique et le sous-jacent, et les considérer comme point de départ d'un processus de conception ; Susciter l'exploration de propriétés souhaitables du fonds
Effet de fixation et verrouillage technico-économique	Surmonter les blocages de l'innovation	Soutenir la conception innovante	Identifier les acteurs (experts) à impliquer dans la conception ; Développer les capacités de conception des acteurs : méthodes de conception, règles de déverrouillage...
Acteurs dispersés et indépendants	Coordonner les acteurs	Rendre visibles les interdépendances et les opportunités d'innovation communes	Explorer les paramètres de conception et les valeurs potentielles au niveau collectif
Agro-écosystème dynamique et partiellement inconnaissable	Assurer un suivi de la trajectoire de l'agro-écosystème	Organiser et outiller le suivi ; Faire perdurer la posture de conception	Développer des outils multicritères utilisables par une diversité d'acteurs ; Créer un collectif pérenne de conception

Tableau 10 : Nouveaux enjeux de gouvernance de l'inconnu commun et implications managériales

L'identification de ces enjeux managériaux et de solutions qui peuvent être apportées pour y répondre nous conduisent maintenant à réfléchir aux contours d'une figure managériale qui pourrait les prendre en charge.

3. Quelles formes managériales pour la conception d'un agro-écosystème ? Implications pour le secteur agricole

a. Les collèges de l'inconnu

Quelles organisations seraient susceptibles de relever les défis managériaux identifiés pour la conception d'un agro-écosystème ? Et quelles implications pourrait-on en retirer pour le secteur agricole ?

Des travaux récents de la littérature en gestion ont identifié une forme managériale adaptée au développement et au maintien des capacités d'innovation dans un secteur économique, plus précisément, à la préservation d'un inconnu commun pour susciter l'innovation collective : il s'agit des « collèges de l'inconnu » (Le Masson *et al.* 2012b).

Le Masson et Weil s'appuient sur des études des cas, en particulier celle de l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors), pour mettre en évidence le fait que certains écosystèmes d'affaires mettent en place des organisations visant à stimuler l'innovation de manière répétée et dans le long terme. Les auteurs nomment ces organisations « collèges de l'inconnu », en référence aux travaux de Crane (1972) sur les « collèges invisibles ». Cet auteur a étudié un réseau de recherche et analysé en particulier un cercle de chercheurs ayant des liens directs et indirects entre eux, qui influençaient les travaux du reste de la communauté. Les collèges de l'inconnu se situent à un niveau intermédiaire entre la firme et l'économie dans son ensemble. Ils permettent aux différents acteurs d'un écosystème d'affaires, généralement en compétition, de collaborer pour faire émerger des innovations de rupture en termes de marchés et de produits. Leur activité n'empêche pas les entreprises d'identifier des solutions concrètes et de les développer ; elle vise à faire perdurer un inconnu commun, un espace de conception collective. Le collège de l'inconnu n'est pas orienté vers un paradigme unique et précis, une technologie spécifique, mais se veut pilote de l'exploration de technologies émergentes et du renouvellement durable des concepts. Il a pour objectif d'explorer pour l'ensemble des acteurs de l'écosystème les voies nouvelles à suivre, notamment à partir de l'identification des limites des solutions techniques actuelles.

Le Masson *et al.* (2012b) analysent que, dans le cadre de l'ITRS, le collège de l'inconnu ne se focalise pas sur ce qui est actuellement connu et traité, mais sur ce qui est inconnu et qui reste à explorer dans les 2 à 15 ans à venir. Les acteurs mobilisent différentes règles de déverrouillage cognitif : ils interagissent sur la base de la « co-stimulation, de la critique amicale et du soutien au

développement de technologies ». L'innovation de rupture est stimulée par la loi de Moore⁷⁷ qui « organise l'obsolescence ». De plus, l'ITRS encourage au développement de solutions alternatives pour chaque type de technologie, sans les juger (« *we are not picking winners or losers* »). Ils classent les différentes solutions alternatives en fonction de leur performance, des connaissances manquantes et des efforts de conception à produire. Le Masson et Weil (2013), soulignent que les collèges de l'inconnu favorisent l'exploration et la circulation des concepts entre les parties prenantes ; ces concepts étant des propositions de solutions souhaitables mais pour le moment inconnues, qui ne sont pas des connaissances établies appropriables ni marchandes. Un autre collège de l'inconnu étudié par Le Masson *et al.* (2012b), cette fois dans le secteur agricole, est l'association « Construire en Chanvre » spécialisée dans la construction utilisant des fibres végétales. Après 15 ans de blocage concernant l'intégration du chanvre dans les matériaux de construction, des producteurs et autres acteurs de la filière dans l'Aube ont créé une association pour organiser régulièrement des rencontres et mener des explorations collectives sur l'amélioration des procédés et la création de nouvelles applications (diversification des matériaux, marchés, techniques, fibres...). Les auteurs identifient qu'une telle organisation a su générer des voies particulièrement innovantes ayant relancé la filière.

Ces « collèges de l'inconnu » nous semblent être des formes d'auto-organisation tout à fait intéressantes pour les cas que nous étudions : ils mettent en évidence que des acteurs, même en compétition, peuvent collaborer sur la création et le maintien d'un espace de conception commun. Constituer de tels collèges pour l'exploration collective ne sera pas facile : comme le souligne Segrestin (2006) (p. 39), « non seulement le personnel nécessaire à une mission n'est pas forcément identifié *a priori*, mais son implication n'est pas nécessairement acquise. Le périmètre du groupe, les relations entre ses membres, les règles qui le régissent et son identité en tant que groupe font donc également partie du champ à explorer et des dimensions à déterminer ».

Le fonctionnement de tels collèges soulève également un certain nombre de difficultés qui ne sont pas sans rappeler celles décrites par Ostrom sur l'auto-organisation. Le Masson et Weil (2013) soulignent qu'ils doivent intégrer le plus de parties prenantes possibles en évitant les passagers clandestins et en faisant venir les « bons concepteurs » ; ils doivent aussi mettre en place des modes de cohésion et de coordination très exigeants, et enfin rouvrir régulièrement l'exploration en évitant les phénomènes d'engouement et en identifiant de nouveaux inconnus. Dans ce cadre, ce qui fait le bien commun est la capacité à identifier un inconnu commun, c'est-à-dire à ouvrir un espace de conception à explorer en commun. Cette capacité repose sur le

⁷⁷ Constatant que la complexité des semiconducteurs doublait tous les ans à coût constant depuis la date de leur invention, Moore a postulé la poursuite de cette croissance ; ce qui a été plus ou moins vérifié par la suite.

collectif participant à ce collège de l'inconnu, mais aussi sur les outils mis en place pour ouvrir ce champ d'exploration : il peut s'agir de référentiels (Agogué 2012), de langages, de méthodes, d'ouvrages scientifiques (Le Masson and Weil 2013), etc. Selon les auteurs, les menaces qui pèsent alors sur cet inconnu commun sont l'appropriation de concepts par certains acteurs, ou encore les effets de fixation qui conduiraient à un appauvrissement des ressources communes.

b. Vers des collèges de l'inconnu dans le secteur agricole ?

Le secteur agricole, nous l'avons évoqué, est un secteur très organisé dans lequel de nombreux collectifs coexistent et se superposent en partie. Des collèges de l'inconnu, tels que celui identifié par Le Masson et Weil dans l'Aube sur le chanvre existent probablement déjà, mais sur d'autres thématiques que l'agro-écologie. La mise en place de collèges de l'inconnu pour la conception des agro-écosystèmes pourrait donc s'appuyer sur des collectifs déjà existants.

Cependant, un agro-écosystème ne correspond pas à une unité de gestion administrative. Il n'y a pas de concepteur ni de gestionnaire légitime à cette échelle ; il n'existe pas non plus *a priori* de communauté identifiée qui pourrait être en charge de ce processus de conception. Aujourd'hui, les territoires ruraux sont marqués par la coexistence de multiples concepteurs spécialisés par secteur (l'activité agricole, l'eau, les forêts, le gibier, l'habitat, les infrastructures, etc.), donc les actions ne sont pas toujours coordonnées. Les collèges de l'inconnu pourraient être un moyen de coordonner ces acteurs autour de la question de l'aménagement de l'agro-écosystème de manière à en préserver le fonctionnement. Les difficultés seront d'identifier les acteurs à impliquer dans l'exploration collective et d'en mobiliser suffisamment de façon à créer un collectif légitime pour prendre en charge la conception et la mise en place de nouvelles règles de gouvernance. Ainsi, en plus des concepteurs classiques de l'agro-écosystème (chercheurs, instituts techniques, agriculteurs (groupements), services déconcentrés, chambres, coopératives...), seront associés de nouveaux acteurs (naturalistes, citoyens, entreprises...) souhaitant être intégrés au processus de conception. Un enjeu sera non seulement d'articuler ces structures avec celles existantes, mais aussi d'articuler les métarègles de gestion liées au sous-jacent avec celles liées aux politiques publiques.

4. De nouvelles perspectives pour les politiques publiques et pour la recherche

Cette analyse, qui met en évidence les enjeux de gouvernance et de gestion soulevés par la nécessité d'une conception collective de l'agro-écosystème présente un certain nombre d'implications en termes de politiques publiques.

Tout d'abord, elle invite à renouveler la logique de l'action publique, qui aujourd'hui ne met pas l'accent sur la conception. Si l'on prend l'exemple des mesures agro-environnementales (MAE), nous avons montré dans l'étude de cas que la conception de tels instruments d'action publique pouvait impliquer des acteurs locaux : par exemple, le Centre d'études biologiques de Chizé a largement contribué à la conception des MAE destinées à la préservation de l'outarde en Poitou-Charentes. Toutefois, cette conception n'a pas mobilisé au même plan les représentants de la profession agricole. Ceux-ci, aujourd'hui, ne contribuent pas non plus à faire évoluer ces instruments. Les agriculteurs ont le choix entre accepter ou non le contrat, entre mettre en place la prairie dans les conditions imposées par la MAE et toucher une subvention, ou ne pas la mettre en place. Le dispositif MAE actuel ne cherche donc pas à susciter l'implication des agriculteurs ni d'autres acteurs dans la conception innovante ; il n'introduit pas d'inconnu commun. Or en alternative à l'incitation économique, qui aujourd'hui est une voie largement privilégiée pour la préservation des services écosystémiques, les pouvoirs publics pourraient soutenir des logiques d'auto-organisation rendues possibles et nécessaires par la conception. Celles-ci pourraient être intéressantes pour remédier aux problèmes de coût générés par des dispositifs tels que les MAE mais aussi au problème de faible efficacité, liée à un manque de durabilité des actions mises en œuvre et à l'insuffisance des échelles auxquelles elles sont déployées (Kleijn *et al.* 2006).

D'autres formes d'action publique pourraient soutenir la conception innovante à l'échelle des agro-écosystèmes. Une première voie possible serait de favoriser la mise en place de collèges de l'inconnu pour la conception et la gestion des agro-écosystèmes. Dans le cas de la plaine de Niort, les autorités locales soutiennent financièrement le montage du projet de filière luzerne. Leur subvention et leur implication dans le pilotage du projet permettent aux acteurs de prendre quelques risques et de lancer une initiative pionnière qui pourrait servir de modèle reproductible ailleurs. Un tel soutien est utile, à la fois pour stimuler l'innovation mais aussi la collaboration entre les acteurs : en effet, la participation des pouvoirs publics au projet institutionnalise le partenariat entre la coopérative et le collectif de recherche (CNRS et INRA). Plus largement, le soutien à la mise en place de collèges de l'inconnu pourrait s'inspirer des travaux s'intéressant au

rôle de l'intervention publique dans le montage et le pilotage des clusters, des pôles de compétitivité ou encore des écosystèmes innovants (Astley and Fombrun 1983; Porter 1998; Agogué 2012). L'idée serait de créer des capacités de conception collective adaptées aux nouveaux enjeux de l'agriculture de façon à proposer des innovations permettant d'améliorer la gestion des écosystèmes.

Une autre voie possible serait celle d'un soutien à la recherche, non seulement pour l'identification des fonds écologiques et des sous-jacents, mais aussi pour le suivi des trajectoires des agro-écosystèmes. Le cas étudié a montré que la détermination du fonds écologique et du sous-jacent avait nécessité d'importants efforts de recherche et avait été rendu possible par le dispositif de suivi à grande échelle et sur le long terme qu'est la Zone Atelier. La reproduction de tels dispositifs de recherche dans un ensemble d'agro-écosystèmes contrastés pourrait être intéressante. Les Zones Ateliers sont assez différentes des Observatoires de Recherche en Environnement (ORE), essentiellement privilégiés à l'INRA, qui sont des dispositifs expérimentaux à grande échelle, mais très instrumentés et généralement largement maîtrisés. Contrairement aux zones ateliers, ils ne permettent pas d'étudier les variations des paramètres environnementaux en lien avec les dynamiques d'acteurs.

D'autre part des réflexions pourraient être menées sur l'organisation de la production et de la diffusion de connaissances de façon à l'adapter aux enjeux de conception des agro-écosystèmes : comment, par exemple, favoriser des initiatives de recherche pluridisciplinaires permettant de produire des connaissances spécifiques aux différents agro-écosystèmes ? Comment susciter des logiques de conception sur des objets intégrés, qui contrasteraient avec l'organisation du système de recherche encore largement disciplinaire et segmenté ? Le modèle « fonds écologique, sous-jacent, inconnu commun » propose un cadre permettant de faire dialoguer agronomes et écologues, mais il y a un enjeu à poursuivre les réflexions scientifiques en ce sens.

Enfin, le soutien des acteurs publics à la recherche pourrait également porter sur le déploiement de méthodes et d'outils pour la conception innovante. Une application d'une méthode de conception innovante initialement développée dans le secteur industriel, la méthode KCP, a été proposée dans la thèse, mais l'analyse et l'adaptation de cette méthode au secteur agricole mériteraient d'être approfondies pour qu'elle devienne réellement opérationnelle, par exemple en appliquant cette méthode dans diverses situations.

Conclusion de la Partie 4

Nous avons élaboré un modèle pour la conception d'un agro-écosystème avec deux préoccupations. La première est de pouvoir qualifier l'objet à concevoir ; nous le nommons « fonds écologique » et nous le dotons d'une propriété souhaitable, le « sous-jacent ». La seconde est de pouvoir initier un processus collectif de conception impliquant les parties prenantes de l'agro-écosystème ; nous considérerons cet objet à concevoir comme un « inconnu commun ». Le sous-jacent est un modèle conceptuel ; il peut ensuite donner lieu à différentes configurations possibles de l'agro-écosystème selon les options de gestion choisies. La modélisation du sous-jacent et du fonds écologique déterminent le périmètre de la conception et le collectif à impliquer.

Le modèle que nous proposons indique une voie possible pour penser un mode de conception des agro-écosystèmes. La méthode proposée consiste en trois étapes : (i) caractériser les sous-jacents critiques à gérer grâce à la mobilisation de connaissances en écologie ; (ii) déterminer un fonds écologique et mobiliser les acteurs concernés pour le gérer en commun ; (iii) considérer le fonds écologique comme un inconnu commun. Cette troisième étape vise surtout à éviter de ne considérer le fonds que selon des valeurs, des usages et des modes de gestion connus, de manière à surmonter les éventuels conflits.

Notre recherche met en évidence les nouveaux enjeux de gouvernance et les défis managériaux soulevés par le fait de considérer le fonds écologique comme un inconnu commun et non comme un bien commun. Elle ouvre de nouvelles perspectives sur le pilotage des processus d'innovation dans le secteur agricole, en s'appuyant sur la notion de « collèges de l'inconnu ». Cette analyse nous conduit à identifier de nouvelles perspectives concernant les politiques publiques et la recherche en vue d'améliorer la durabilité des agro-écosystèmes.

Conclusion générale

Mettre la gestion des écosystèmes au cœur des réponses à la crise environnementale de l'agriculture soulève des problèmes d'innovation nouveaux pour le secteur agricole : une telle perspective implique de revoir la nature des objets à concevoir, les acteurs à impliquer, ainsi que les objectifs de la conception. C'est la problématique qu'a développée notre thèse. Dans cette conclusion, nous rappelons nos principaux résultats et indiquons quelques limites de notre travail, ainsi que des perspectives de recherche que nous pensons fructueuses.

Rappel des principaux résultats de la thèse

Un premier résultat de notre recherche concerne une nouvelle interprétation de la crise environnementale de l'agriculture ; son intérêt est d'éclairer les raisons des difficultés d'innovation rencontrées aujourd'hui pour y remédier. Les deux principales disciplines scientifiques concernées par la problématique de la crise des écosystèmes, l'agronomie et l'écologie, ont élaboré des modélisations qui ont permis de produire de nombreuses connaissances sur les écosystèmes, mais essentiellement orientées par une logique de connaissance propre, si bien que leurs apports pour l'action s'en trouvent limités. L'agronomie a développé des savoirs sur les régulations écologiques directement impliquées dans la production agricole, en raisonnant de manière toujours plus ciblée sur les cultures et « toutes choses étant égales par ailleurs ». Cette stratégie de recherche a permis de découpler les objets de conception (entre eux, et de leur environnement) et de fragmenter la conception. En contrepartie, des régulations écologiques importantes ont été exclues des raisonnements de conception. L'écologie a fourni de nombreuses connaissances sur les régulations écologiques sans se focaliser sur la production agricole. Cependant la mise en évidence de couplages infinis des régulations au sein des écosystèmes a finalement conduit l'agriculture à une crise de l'action : comment mener des raisonnements de conception sur des objets aussi complexes et couplés que les écosystèmes ?

Considérer l'agro-écosystème comme objet de conception soulève plusieurs problèmes inédits. On ne le peut concevoir et prédire son évolution que partiellement, car en tant qu'écosystème il est doté de régulations propres, en partie inconnues. Un agro-écosystème n'a pas de concepteur donné ni légitime : la prise en compte de la gestion de processus écologiques requiert une coordination à plus large échelle que celle de la parcelle ou même de l'exploitation agricole. Cet ensemble de problèmes est d'autant plus difficile à instruire que l'agro-écosystème a longtemps été un point aveugle de l'agronomie et de l'écologie : de l'agronomie en raison de sa logique de

découplage des objets de conception, et de l'écologie car pendant longtemps cette discipline ne s'est pas intéressée aux écosystèmes cultivés. Récemment, ces deux disciplines ont introduit de nouveaux concepts, tel que celui de paysage, qui permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives sur la gestion des écosystèmes. Notre thèse met en évidence qu'un nouvel enjeu pour la recherche scientifique est d'apprendre à piloter les régulations écologiques au sein des agro-écosystèmes de manière à rendre l'agriculture durable. Ce pilotage concerne non seulement des régulations existantes et connues, mais aussi, selon nous, les régulations souhaitables, de façon à mettre en évidence les paramètres sur lesquels l'action peut avoir prise, en d'autres termes les espaces de conception possibles.

Un deuxième résultat de notre recherche résulte d'une critique des approches classiques sur la gestion des écosystèmes, qui accordent peu d'importance aux processus de conception spécifiques aux agro-écosystèmes. La littérature sur les services écosystémiques est féconde, notamment par comparaison avec la notion d'externalités, car elle permet de qualifier la façon dont les écosystèmes sont impactés par les activités humaines. La production de tels services est prise en compte dans les analyses économiques, mais la modélisation et les calculs économiques butent sur des obstacles, d'après nous, majeurs. Ces approches reposent sur une vision statique des écosystèmes et de leurs services. Qu'ils soient préservés ou dégradés, valorisés ou externalisés, ceux-ci sont considérés comme qualifiés (identifiés, spécifiés, voire normés) préalablement à la mise en place des actions de gestion, et cette qualification est stable, elle n'est plus remise en question, par exemple sous l'effet d'une controverse. La critique de la littérature sur les biens communs aboutit à un constat semblable. Par rapport aux logiques économiques classiques notamment, cette littérature prend en compte les formes d'action collective qui semblent particulièrement adaptées à la gestion des écosystèmes. Cependant les *common pool resources* modélisées par Elinor Ostrom, sur lesquels s'est focalisée notre analyse, sont d'une part des biens particuliers (des ressources génériques : la forêt...) qui ne permettent pas de rendre compte de la complexité du fonctionnement des écosystèmes ; d'autre part leur identité, leurs usages et leurs valeurs sont considérés comme stables. Ces deux champs de littérature sur les services écosystémiques et sur les biens communs, par ailleurs féconds et importants, conduisent néanmoins à contraindre les décisions de gestion des écosystèmes dans des schémas connus.

Le cas empirique que nous avons étudié, archétype d'une agriculture céréalière intensive, donne à voir les difficultés que peut soulever le passage de la prise en compte du fonctionnement de l'écosystème à la conception d'un agro-écosystème. Ni les efforts de modélisation de l'agro-écosystème réalisés par des chercheurs en écologie, ni même leur implication délibérée dans une

tentative d'innovation, ne suffisent à surmonter véritablement les obstacles à l'innovation. Cette initiative montre que conduire des acteurs qui ont des intérêts divergents vis-à-vis de l'agro-écosystème à concevoir ensemble des solutions de gestion collectivement souhaitables peut créer des conditions favorables pour surmonter une situation de blocage de l'innovation. Mais cette tentative montre que considérer ces solutions souhaitables comme encore inconnues et piloter un processus collectif de conception sont deux défis pour lesquels les divers acteurs d'un territoire sont peu outillés.

Notre troisième résultat de thèse est traduit dans un outil conceptuel qui permet de considérer un fonds écologique comme un inconnu commun. Nous avons élaboré un modèle de conception d'un agrosystème à partir de l'analyse des modélisations récentes de l'écologie – comme celle du paysage. Ce modèle apporte une solution à deux problèmes mis en évidence précédemment dans la thèse : il qualifie ce qui est à concevoir dans un agro-écosystème ; il pose les conditions initiales d'un processus collectif de conception, efficace et pérenne, impliquant les parties prenantes de l'agro-écosystème. L'objet à concevoir est le « fonds écologique », que l'on peut déterminer à l'aide d'une propriété rendant compte de régulations écologiques à préserver : un « sous-jacent ». Le sous-jacent est un modèle conceptuel ; il peut ensuite donner lieu à différentes configurations possibles de l'agro-écosystème selon les options de gestion choisies. Pour faire de ce fonds écologique le point de départ d'un processus de conception, nous mettons en exergue sa dimension collective et la dimension inconnue (et non partagée) de sa connaissance : nous le qualifions d' « inconnu commun ». La modélisation du sous-jacent et du fonds écologique déterminent le périmètre de la conception et le collectif à impliquer. Toute partie prenante concernée peut contribuer à concevoir le fonds en lui attribuant des propriétés (ou options de gestion) souhaitables, à condition qu'elles respectent le sous-jacent.

Le modèle que nous proposons n'est pas général ; il indique une voie possible pour penser un mode de conception des agro-écosystèmes. La méthode proposée se décompose en trois étapes : (i) caractériser les sous-jacents critiques à gérer grâce à la mobilisation de connaissances en écologie ; (ii) déterminer un fonds écologique et mobiliser les acteurs concernés pour le gérer en commun ; (iii) considérer le fonds écologique comme un inconnu commun. Cette troisième étape vise surtout à éviter de considérer le fonds uniquement selon des valeurs, des usages et des modes de gestion connus, de manière à surmonter les éventuels conflits. Une telle posture conduit à explorer les potentiels collectifs : il n'y a pas de bien commun au départ, mais ce qui pourra être collectivement réalisé deviendra un bien commun. Dans le cas empirique, nous avons appliqué une méthode exploratoire mobilisant la notion de « concept-projecteur ». Cependant diverses

stratégies sont possibles pour explorer une valorisation collective du fonds. Notre thèse souligne enfin un certain nombre de perspectives managériales pour relever les défis de gouvernance liés à la conception collective des agro-écosystèmes.

Quelques limites du travail présenté

Le modèle ne permet pas de surmonter l'ensemble des difficultés liées au « couplage infini » des régulations des écosystèmes : il ne permet pas de prendre en compte toutes les régulations écologiques qu'il faudrait préserver. Il propose un protocole partiel visant à ré-élargir le nombre de régulations prises en compte dans la conception agronomique. Le processus de conception doit être accompagné d'un système de suivi sur le long terme pour identifier les éventuelles répercussions non anticipées des pratiques de gestion mises en place.

La thèse ne donne pas de solution pour résoudre la crise environnementale de l'agriculture ; elle indique surtout un changement de perspective. Elle n'aborde pas frontalement les problématiques économiques liées à la mise en place d'une démarche de conception collective pour mener un projet à l'échelle d'un territoire.

Dans le même ordre d'idées, il faudrait approfondir les modalités d'action collective pour gérer les biens conçus en commun : ces biens peuvent nécessiter une mise en œuvre individuelle. Par conséquent, il faudrait mettre en place des dispositifs de coordination adaptés (mutualisation des risques, systèmes de compensation ou de péréquation, partage des résultats, etc.). Les choix collectifs et les règles de partage auront des impacts sur les individus qu'il sera nécessaire d'évaluer.

Quelques perspectives de recherche

La recherche ouvre plus généralement sur une discussion des biens communs et de l'innovation collective. On peut tout d'abord se demander si la qualification « biens communs » n'incite justement pas à un phénomène de naturalisation : les notions de bien et de service, centrales en économie, renvoient à des objets connus et identifiés. De telles expressions tendent à enfermer dans des schémas connus, même si par ailleurs la question de l'incertitude (plus exactement du risque, pour le présent et le futur) est prise en considération : préserver les ressources naturelles, limiter l'appropriation de connaissances en accès libre... Le fait de les désigner comme des « inconnus communs » positionne d'emblée les acteurs dans un autre rapport aux biens : ils sont impliqués dans la conception des biens, dans une exploration collective qui non seulement peut permettre de préserver les biens mais aussi de générer de nouveaux biens communs. La

formulation « inconnu commun » nous donc semble pouvoir élargir le champ des actions collectives possibles.

Il existe de nombreuses situations où les acteurs doivent se coordonner pour résoudre des problèmes de nature variée, nécessitant des innovations. Dans de telles situations, il n'y a pas de biens communs, mais des potentiels communs. Comment la notion d'inconnu commun peut-elle les éclairer ? Le modèle proposé dans la thèse suppose d'identifier un sous-jacent à gérer et un fonds écologique pour déterminer un inconnu commun. Peut-il être mobilisé dans d'autres domaines, dans lesquels les équivalents des sous-jacents seraient par exemple des métarègles de gestion ? Observerait-on alors des enjeux de gouvernance similaires à ceux que l'on a étudiés dans la thèse ?

Enfin, la thèse ouvre probablement des perspectives nouvelles pour aborder la question des écosystèmes non plus agricoles ou « naturels », mais des écosystèmes d'affaires (Moore 1993). Ce concept a été introduit en sciences de gestion pour analyser les dynamiques d'acteurs dans un contexte de forte demande d'innovation. Il est mobilisé notamment pour étudier des stratégies de partage de la valeur (Jacobides *et al.* 2006), de coévolution entre les acteurs (Mitleton-Kelly 2003) ou encore le positionnement stratégique des entreprises dans l'écosystème (Iansiti and Levien 2004). Le concept d'écosystème d'affaires met en évidence des interdépendances et des logiques d'intérêt commun entre les acteurs d'un secteur économique (Agogué *et al.* 2012). Or ces interdépendances ne sont pas forcément connues *a priori* : d'un point de vue managérial, il s'agit d'organiser les interactions entre les acteurs de manière à ce que leurs capacités d'innovation conduisent à une création de valeur. L'exploration collective des inconnus communs peut justement être un moyen de piloter ces interactions. Le champ des écosystèmes d'affaires pourrait donc être intéressant pour mettre à l'épreuve et enrichir le cadre d'analyse proposé dans la thèse.

Références bibliographiques

- Acot, P. (1988). Histoire de l'écologie, Presses Universitaires de France.
- Aggeri, F. (1999). "Environmental policies and innovation, a knowledge-based perspective on cooperative approaches." *Research Policy* **vol. 28**: pp. 699-717.
- Agogué, M. (2012). Modéliser l'effet des biais cognitifs sur les dynamiques industrielles: Innovation orpheline et architecte de l'inconnu, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Agogué, M., Arnoux, F., Brown, I. and Hooge, S. (2013). Introduction à la Conception Innovante: éléments théoriques et pratiques de la théorie CK, Presse des Mines ParisTech.
- Agogué, M., Berthet, E. T. A. and Hooge, S. (2012). From ecology to management sciences: towards a modeling of the dynamics of stakeholders in an innovating ecosystem. IPDM. Manchester, UK.
- Altieri, M. A. (1989). "Agroecology: a new research and development paradigm for world agriculture." *Agriculture, Ecosystems & Environment* **27**(1): 37-46.
- Altieri, M. A., Letourneau, D. K. and Davis, J. R. (1983). "Developing sustainable agroecosystems." *Bioscience*: 45-49.
- Anderies, J. M., Janssen, M. A. and Ostrom, E. (2004). "A Framework to Analyze the Robustness of Social-ecological Systems from an Institutional Perspective." *Ecology and Society* **9**(1): 18.
- Anderies, J. M., Rodriguez, A. A., Janssen, M. A. and Cifdaloz, O. (2007). "Going Beyond Panaceas Special Feature: Panaceas, uncertainty, and the robust control framework in sustainability science." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(39): 15194-15199.
- Argyris, C., Putnam, R. and Smith, D. M. (1985). Action science – concepts, methods & skills for research & intervention. San Fransisco, Jossey Bass.
- Arnoux, F. (2013). Modéliser et organiser la conception innovante : le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aéronautiques, Mines ParisTech.
- Astley, W. G. and Fombrun, C. J. (1983). "Collective Strategy: Social Ecology of Organizational Environments." *Academy of Management Review* **8**(4): 576-587.
- Aznar, O. (2002). Services environnementaux et espaces ruraux - Une approche par l'économie des services, Université de Bourgogne.
- Aznar, O., Guérin, M., PAOLI, J. and TORRE, A. (2002). "Dynamiques institutionnelles et émergence de la multifonctionnalité: les procédures de résolution des conflits liés à la gestion de l'espace." *Les Cahiers de la multifonctionnalité*(1): 73-84.
- Aznar, O. and Perrier-Cornet, P. (2003). "Les services environnementaux dans les espaces ruraux : une approche par l'économie des services." *Economie Rurale* **273-274**: 142-157.
- Azzi, G. (1922). "The problem of agricultural ecology." *Geografiska Annaler* **4**: 137-146.
- Badenhausser, I., Amouroux, P., Lerin, J. and Bretagnolle, V. (2009). "Acridid (Orthoptera: Acrididae) abundance in Western European Grasslands: sampling methodology and temporal fluctuations." *Journal of Applied Entomology* **133**(9-10): 720-732.
- Barbault, R. (2008). Écologie générale : Structure et fonctionnement de la biosphère, Dunod.

- Begon, M., Townsend, C. R. and Harper, J. L. (2005). *Ecology: From Individuals to Ecosystems*, Wiley-Blackwell.
- Bellon, S., Bockstaller, C., Fauriel, J., Geniaux, G. and Lamine, C. (2007). "To design or to redesign: how can indicators contribute." *Farming Systems Design*: 133-134.
- Benkeltoum, N. (2009). *Les régimes de l'Open Source: solidarité, innovation et modèles d'affaires*. Thèse de doctorat en sciences de gestion, Mines ParisTech.
- Benkler, Y. (2002). "Coase's Penguin, or, Linux and 'The Nature of the Firm'." *Yale Law Journal*: 369-446.
- Bennett, E. M., Peterson, G. D. and Gordon, L. J. (2009). "Understanding relationships among multiple ecosystem services." *Ecology Letters* **12**(12): 1394-1404.
- Bensin, B. M. (1928). *Agroecological characteristics description and classification of the local corn varieties chorotypes*, Publisher unknown so far.
- Benton, T. G., Vickery, J. A. and Wilson, J. D. (2003). "Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?" *Trends in Ecology & Evolution* **18**(4): 182-188.
- Berthet, E. T. A. (2010). *La conception innovante à l'appui d'une gestion collective des services écosystémiques. Etude d'un cas de mise en œuvre de Natura 2000 en plaine céréalière*. M. d. M. R.-M. S. d. Gestion, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Mines ParisTech, ESCP, CNRS.
- Berthet, E. T. A., Barnaud, C., Girard, N. and Labatut, J. (2012a). *Toward a reflexive framework to compare collective design methods for farming system innovation*. IFSA. Aarhus, Denmark.
- Berthet, E. T. A., Bretagnolle, V. and Segrestin, B. (2012b). "Analyzing the Design Process of Farming Practices Ensuring Little Bustard Conservation: Lessons for Collective Landscape Management." *Journal of sustainable agriculture* **36**(3): 319-336.
- Blandin, P. (2007). *L'écosystème existe-t-il? Le tout et la partie en écologie. Le tout et les parties dans les systèmes naturels*. T. Martin. Paris, Vuibert: 21-46.
- Blandin, P. (2009). *De la protection de la nature au pilotage de la biodiversité*, Editions Quae.
- Blandin, P. and Bergandi, D. (1997). "Entre la tentation du réductionnisme et le risque d'évanescence dans l'interdisciplinarité: l'écologie à la recherche d'un nouveau paradigme." *COLLOQUES-INRA*: 113-130.
- Blondel-Mégrelis, M. (2007). *Le regard agro-écologiste des chimistes de la première moitié du 19^e siècle. Histoire et agronomie : entre ruptures et durée*. P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 151-164.
- Boulaine, J. (1996). *Histoire de l'Agronomie Lavoisier* Paris: 432 pages.
- Boulding, K. E. (1966). "The economics of the coming spaceship earth." *Environmental quality in a growing economy* **2**: 3-14.
- Bouty, C. and Bouviala, M. (2012). *Quels liens entre conduite de la luzerne et production de services écosystémiques en plaine céréalière ?* Projet d'ingénieur 3^e année. Dominante "Production et Innovation dans les Systèmes Techniques végétaux". Paris, AgroParisTech.
- Boyd, J. and Banzhaf, S. (2007). "What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units." *Ecological Economics* **63**(2-3): 616-626.

- Bretagnolle, V., Gauffre, B., Meiss, H. and Badenhauer, I. (2011). The role of grassland areas within arable cropping systems for the conservation of biodiversity at the regional level. *Grassland Productivity and Ecosystem Services*. G. Lemaire, J. A. Hodgson and A. Chabbi: 251-260.
- Bretagnolle, V. and Inchausti, P. (2005). "Modelling population reinforcement at a large spatial scale as a conservation strategy for the declining little bustard (*Tetrax tetrax*) in agricultural habitats." *Animal Conservation* **8**(1): 59-68.
- Broughton, E. and Pirard, R. (2011). What's in a name? Market-based Instruments for Biodiversity. *Health and Environment Reports*. IFRI. Paris. **n°8**.
- Bryan, B. A., Raymond, C. M., Crossman, N. D. and Macdonald, D. H. (2010). "Targeting the management of ecosystem services based on social values: Where, what, and how?" *Landscape and Urban Planning* **97**(2): 111-122.
- Burel, F. and Baudry, J. (1999). *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications*. Paris, Lavoisier.
- Butault, J., Dedryver, C., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., et al. (2010). "Ecophyto R&D Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides." *Synthèse du rapport d'étude*. France: INRA éditeur.
- Carlson, J. M. and Doyle, J. (2002). "Complexity and robustness." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**(Suppl 1): 2538-2545.
- Carson, R. (1962). "Silent Spring. 368 pp." Houghton Mifflin Co., Boston.
- Chevassus-au-Louis, B., Salles, J.-M. and Pujol, J.-L. (2009). *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique.*, Centre d'analyse stratégique.
- Chisholm, R. A. (2010). "Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot." *Ecological Economics* **69**(10): 1973-1987.
- Christie, M., Fazey, I., Cooper, R., Hyde, T. and Kenter, J. O. (2012). "An evaluation of monetary and non-monetary techniques for assessing the importance of biodiversity and ecosystem services to people in countries with developing economies." *Ecological Economics* **83**: 69-80.
- Ciriacy-Wantrup, S. V. and Bishop, R. C. (1975). "Common property as a concept in natural resources policy." *Nat. Resources J.* **15**: 713.
- Cordellier, S. and Le Guen, R. (2008). *Organisations professionnelles agricoles : histoire et pouvoirs Dossier : L'univers des organisations professionnelles agricoles - POUR n°196-197*. E. J.-F. Ayats, S. Cordellier, J. Vincent and L. M. Voisin, GREP.
- Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R. D., Farber, S., Grasso, M., et al. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature* **387**(6630): 253-260.
- Costanza, R. and Daly, H. E. (1992). "Natural capital and sustainable development." *Conservation Biology* **6**(1): 37-46.
- Costanza, R. L. A. (2009). *Herman Daly Festschrift: Toward a sustainable and desirable future: a 30 year collaboration with Herman Daly Encyclopedia of Earth*. J. Farley. Washington, D.C, Eds. Cutler J. Cleveland. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment.

- Coulon, J.-B. and Meynard, J.-M. (2011). "Vers une agriculture à hautes performances environnementales : Etat des lieux des voies d'amélioration technique proposées par l'INRA." *Innovations Agronomiques* **12**: 1-15.
- Cowan, R. and Gunby, P. (1996). "Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies." *The Economic Journal*: 521-542.
- Crane, D. (1972). *Invisible colleges: Diffusion of knowledge in scientific communities*, University of Chicago Press Chicago.
- Daily, G. C. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*, Island Press.
- Daily, G. C. (1999). "Developing a scientific basis for managing Earth's life support systems." *Conservation Ecology* **3**(2): 14.
- Daily, G. C. and Matson, P. A. (2008). "Ecosystem services: From theory to implementation." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(28): 9455-9456.
- Daly, H. E. (1968). "On economics as a life science." *The Journal of Political Economy* **76**(3): 392-406.
- Daly, H. E. (1995). "On Nicholas Georgescu-Roegen's contributions to economics: an obituary essay." *Ecological Economics* **13**(3): 149-154.
- David, A. (2000). *Logique, épistémologie et méthodologie en sciences de gestion. Les nouvelles fondations des sciences de gestion*. A. David, A. Hatchuel and R. Laufer, Vuibert - Collection FNEGE.
- David, A. (2002). *Intervention Methodologies in Management Research*. EURAM Conference, Stockholm.
- David, A., Hatchuel, A. and Laufer, R. (2012). *Les nouvelles fondations des sciences de gestion*, Presses des Mines.
- de Groot, R. S. (1992). *Functions of nature: evaluation of nature in environmental planning, management and decision making*, Wolters-Noordhoff BV.
- De Groot, R. S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L. C., et al. (2010). *Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. TEEB Foundations 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB): Ecological and Economic Foundations*. K. P. London Earthscan: 9-40.
- Dedet, J.-P. (2007). *La microbiologie, de ses origines aux maladies émergentes*.
- Denis, G. (2007). *L'agronomie au sens large : une histoire de son champ, de ses définitions et des mots pour l'identifier. Histoire et agronomie : entre ruptures et durée*. P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 61-90.
- Díaz, S., Lavorel, S., de Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., et al. (2007). "Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(52): 20684-20689.
- Donald, P. F., Green, R. E. and Heath, M. F. (2001). "Agricultural intensification and the collapse of Europe's farmland bird populations." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **268**(1462): 25-29.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., et al. (2011). "Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge." *European Journal of Agronomy* **34**(4): 197-210.

- Doussan, I. (2009). Les services écologiques : un nouveau concept pour le droit de l'environnement ? La responsabilité environnementale, prévention, imputation, réparation, Le Mans, FRA, Editions Dalloz.
- Drouin, J.-M. (1991). Réinventer la nature. L'écologie et son histoire. Paris, Flammarion.
- Ekins, P., Simon, S., Deutsch, L., Folke, C. and De Groot, R. (2003). "A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability." *Ecological Economics* **44**(2-3): 165-185.
- Elmquist, M. and Segrestin, B. (2009). The Challenges of managing open innovation in highly innovative fields: exploring the use of the KCP method. EURAM. Liverpool.
- Engelberg, J. and Boyarsky, L. L. (1979). "The noncybernetic nature of ecosystems." *American Naturalist*: 317-324.
- FAO (2007). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture - Payer les agriculteurs pour les services environnementaux. C. F. A. N. 38. Rome.
- Farley, J. and Costanza, R. (2010). "Payments for ecosystem services: From local to global." *Ecological Economics* **69**(11): 2060-2068.
- Faucheux, S. and O'Connor, M. (2001). Le capital naturel et la demande sociale pour les biens et les services environnementaux. Journées du programme environnement vie et sociétés du CNRS. Lille.
- Ferrari, S. (2011). Fondements et enjeux bioéconomiques de la durabilité : un éclairage à partir des travaux de Nicholas Georgescu-Roegen. Colloque international francophone « Le développement durable : débats et controverses ». Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Feyt, H. (2007). Evolutions et ruptures en amélioration des plantes. Histoire et agronomie : entre ruptures et durée. P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 215-228.
- Fischer, J., Lindenmayer, D. B. and Manning, A. D. (2006). "Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes." *Frontiers in Ecology and the Environment* **4**(2): 80-86.
- Fisher, B. and Turner, R. K. (2008). "Ecosystem services: Classification for valuation." *Biological Conservation* **141**(5): 1167-1169.
- Fisher, B., Turner, R. K. and Morling, P. (2009). "Defining and classifying ecosystem services for decision making." *Ecological Economics* **68**(3): 643-653.
- Flahault, C. (1901). La nomenclature de la géographie botanique. *Annales de Géographie, Société de géographie*.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., et al. (2005). "Global consequences of land use." *Science* **309**(5734): 570-574.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., et al. (2011). "Solutions for a cultivated planet." *Nature* **478**(7369): 337-342.
- Forman, R. T. T. and Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. New York.
- Geels, F. W. (2004). "From sectoral systems of innovation to socio-technical systems." *Research Policy* **33**(6-7): 897-920.
- Georgescu-Roegen, N. (1966). *Analytical economics: issues and problems*, Harvard University Press Cambridge.

- Georgescu-Roegen, N., Ed. (1971). *The entropy Law and the economic process*, Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen, N. (1976). *Energy and economic myths*, Pergamon Press.
- Gliessman, S. R. (2007). *Agroecology: the ecology of sustainable food systems*. New York, Taylor & Francis.
- Goldman, R. L., Thompson, B. H. and Daily, G. C. (2007). "Institutional incentives for managing the landscape: Inducing cooperation for the production of ecosystem services." *Ecological Economics* **64**(2): 333-343.
- Golley, F. B. (1991). "The ecosystem concept: A search for order." *Ecological Research* **6**(2): 129-138.
- Griffon, M. (2013). *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?*, Quae.
- Hannachi, M. (2011). *La coopétition au service du bien commun: les stratégies des entreprises de collecte et de stockage de céréales face aux OGM*, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - INRA.
- Hanski, I. (1999). "Habitat connectivity, habitat continuity, and metapopulations in dynamic landscapes." *Oikos* **87**(2): 209-219.
- Hardin, G. (1968). "The tragedy of the commons." *Science* **162**: 1243-1248.
- Hatchuel, A. (2000a). *Intervention Research and the Production of Knowledge. Cow Up a Tree, Knowing and learning for change in agriculture*. L. Group. Paris, INRA: pp. 55-68.
- Hatchuel, A. (2000b). *Quel horizon pour les sciences de gestion ? Vers une théorie de l'action collective. Les nouvelles fondations des sciences de gestion, éléments d'épistémologie en management*. A. David, A. Hatchuel and R. Laufer. Paris, Vuibert.
- Hatchuel, A. (2002). "Towards Design Theory and expandable rationality : The unfinished program of Herbert Simon." *Journal of Management and Governance* **5**(3-4): 260-273.
- Hatchuel, A. (2008). *Quel horizon pour les sciences de gestion? Vers une théorie de l'action collective. Les nouvelles fondations des sciences de gestion*. A. David, A. Hatchuel and R. Laufer, FNEGE - Vuibert: 7-43.
- Hatchuel, A. and David, A. (2007). *Collaborating for management research: from action research to intervention research in management. Handbook of collaborative management research*. R. A. B. Shani, S. A. Mohrman, W. A. Pasmore, B. Stymne and N. Adler, Sage Publications: pp. 143-162.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Reich, Y. and Weil, B. (2011). *A systematic approach of design theories using generativeness and robustness. International conference on engineering design (ICED)*. Copenhagen, Denmark.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Segrestin, B. and Weil, B. (2009a). *A new approach of collaborative innovative design: the KCP experiences. SIG Design theory*. Paris, Ecole des Mines.
- Hatchuel, A., Le Masson, P. and Weil, B. (2009b). *Design theory and collective creativity: a theoretical framework to evaluate KCP Process. International conference on engineering design, ICED'09*. Stanford, CA, USA.
- Hatchuel, A. and Molet, H. (1986). "Rational Modelling in understanding and aiding human decision-making : about two case-studies." *European Journal of Operational Research* **24**: pp. 178-186.

- Hatchuel, A., Reich, Y., Le Masson, P., Weil, B. and Kazakci, A. (2013). Beyond Models and Decisions: Situating Design through generative functions. International Conference on Engineering Design (ICED). Seoul, Korea.
- Hatchuel, A. and Weil, B. (2003). A new approach of innovative design: an introduction to C-K theory. ICED'03. Stockholm, Sweden.
- Hatchuel, A. and Weil, B. (2009). "C-K design theory: an advanced formulation." *Research in Engineering Design* **19**: 181-192.
- Hess, C. and Ostrom, E. (2007). Private and common property rights. Cambridge, MA, The MIT Press.
- Holling, C. S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual review of ecology and systematics* **4**: 1-23.
- Horlings, L. and Marsden, T. (2011). "Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'." *Global Environmental Change* **21**(2): 441-452.
- IAASTD (2009). Agriculture at a Crossroads - Global Report.
- Iansiti, M. and Levien, R. (2004). "Strategy as Ecology." *Harvard Business Review* **82**(3): 68-78.
- IDDRI (2011). Les instruments de marché pour la biodiversité : la nature à tout prix ? Comptendu des interventions lors de la conférence internationale organisée par la Fondation d'entreprise Hermès et l'Institut du développement durable et des relations internationales, Paris.
- IFEN (2002). L'environnement en France. Orléans, France.
- Inchausti, P. and Bretagnolle, V. (2005). "Predicting short-term extinction risk for the declining Little Bustard (*Tetrax tetrax*) in intensive agricultural habitats." *Biological Conservation* **122**(3): 375-384.
- Jacobides, M. G., Knudsen, T. and Augier, M. (2006). "Benefiting from innovation : Value creation, value appropriation and the role of industry architectures." *Research Policy* **Vol. 35**: pp. 1200-1221.
- Janssen, M. A. and Ostrom, E. (2006). "Empirically Based, Agent-based models." *Ecology and Society* **11**(2): 37.
- Johnson, J. P. (2002). "Open source software: private provision of a public good." *Journal of Economics & Management Strategy* **11**(4): 637-662.
- Jolivet, C. (2001). Programme expérimental de sauvegarde de l'Outarde canepetière en France - Rapport final et analyse synthétique des actions 1997 - 2001, LPO / Union Européenne (LIFE Nature) / Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- Jolivet, C. and Bretagnolle, V. (2002). "L'outarde canepetière en France: évolution récente des populations, bilan des mesures de sauvegarde et perspectives d'avenir." *Alauda* **70**(1): 93-96.
- Jouve, P. (2007). Périodes et ruptures dans l'évolution des savoirs agronomiques et de leur enseignement. Histoire et agronomie : entre ruptures et durée. P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 109-120.
- Kareiva, P., Watts, S., McDonald, R. and Boucher, T. (2007). "Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare." *Science* **316**(5833): 1866-1869.

- Kettunen, M., Baldock, D., ten Brink, P., Lutchman, I., Tucker, G., et al. (2010). Biodiversity Policy Post-2010. Exploring the possibilities for safeguarding broader ecosystems – A scoping paper. W. I. f. E. E. P. (IEEP). London / Brussels: 53.
- Kleijn, D., Baquero, R. A., Clough, Y., Diaz, M., Esteban, J., et al. (2006). "Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five European countries." *Ecology Letters* **9**(3): 243-254.
- Kollock, P. (1998). "Social dilemmas: The anatomy of cooperation." *Annual review of sociology*: 183-214.
- Kremen, C. and Ostfeld, R. S. (2005). "A call to ecologists: measuring, analyzing, and managing ecosystem services." *Frontiers in Ecology and the Environment* **3**(10): 540-548.
- Labatut, J. (2009). Gérer des biens communs: processus de conception et régimes de coopération dans la gestion des ressources génétiques animales, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Lamarque, P., F., Q. and Lavorel, S. (2011). "The diversity of the ecosystem services concept and its implications for their assessment and management." *Comptes Rendus Biologies* **334**(5–6): 441-449.
- Lant, C. L., Ruhl, J. and Kraft, S. E. (2008). "The tragedy of ecosystem services." *Bioscience* **58**(10): 969-974.
- Latraube, F. and Boutin, J.-M. (2008). "L'outarde canepetière : Quelle évolution en milieux cultivés ? Exemple dans les Deux-Sèvres." *ONCFS, faune sauvage*(n° 279).
- Lavorel, S., Touzard, B., Lebreton, J.-D. and Clément, B. (1998). "Identifying functional groups for response to disturbance in an abandoned pasture." *Acta Oecologica* **19**(3): 227-240.
- Le Guen, R. (2008). Du système aux acteurs ? Dossier : L'univers des organisations professionnelles agricoles - POUR n°196-197. E. J.-F. Ayats, S. Cordellier, J. Vincent and L. M. Voisin, GREP.
- Le Masson, P., Aggeri, F., Barbier, M. and Caron, P. (2012a). The sustainable fibres of generative expectation management: The "building with hemp" case study. System Innovations, Knowledge Regimes, and Design Practices towards Transitions for Sustainable Agriculture. M. Barbier and B. Elzen. Paris, INRA Editions: 226-251.
- Le Masson, P., Dorst, K. and Subrahmanian, E. (2013). "Design theory: history, state of the art and advancements." *Research in Engineering Design* **24**(2): 97-103.
- Le Masson, P., Hatchuel, A. and Weil, B. (2010). Modeling novelty-driven industrial dynamics with design functions: understanding the role of learning from the unknown. Process, Technology, and Organisation: Towards a useful Theory of Production. Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa.
- Le Masson, P. and Weil, B. (2013). Les collèges de l'inconnu : conditions et vecteurs des rationalisations futures de l'entreprise ? Colloque de Cerisy: A qui appartiennent les entreprises? Vers de nouveaux référentiels de l'engagement collectif.
- Le Masson, P., Weil, B. and Hatchuel, A. (2006). Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises, Hermes science publ.
- Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A. and Cogez, P. (2012b). "Why are they not locked in waiting games? Unlocking rules and the ecology of concepts in the semiconductor industry." *Technology Analysis & Strategic Management* **24**(6): 617-630.

- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., et al. (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France).
- Lemaire, G. c. (2009). PRAITERRRE - Prairies, territoires, Ressources et Environnement: Rapport final., Programme Agriculture et développement durable, ANR.
- Lewin, K. (1951). Field theory in social science: selected theoretical papers, Harper and Row.
- Liebowitz, S. J. and Margolis, S. E. (1995). "Path dependence, lock-in, and history." *Journal of Law, Economics, & Organization*: 205-226.
- Loreau, M. (2001). "Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges." *Science* **294**(5543): 804-808.
- Loucks, O. L. (1977). "Emergence of research on agro-ecosystems." *Annual review of ecology and systematics* **8**: 173-192.
- Malghan, D. V. (2006). On Being the Right Size: A Framework for the Analytical Study of Scale, Economy, and Ecosystem, Public Affairs. University of Maryland, College Park.
- Martín-López, B., Gómez-Baggethun, E., García-Llorente, M. and Montes, C. (2013). "Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment." *Ecological Indicators*.
- Martin, E. A., Reineking, B., Seo, B. and Steffan-Dewenter, I. (2013). "Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**(14): 5534-5539.
- Mazoyer, M. and Roudart, L. (2002). Histoire des agricultures du monde, ULB--Universite Libre de Bruxelles.
- McGinnis, M. D. (2011). "An Introduction to IAD and the Language of the Ostrom Workshop: A Simple Guide to a Complex Framework." *The Policy Studies Journal* **39**(1): 163-177.
- McGinnis, M. D. and Walker, J. M. (2010). "Foundations of the Ostrom workshop: institutional analysis, polycentricity, and self-governance of the commons." *Public Choice* **143**(3-4): 293-301.
- MEA, M. E. A. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. C. Island Press. Washington (DC).
- Meadows, D. H., Randers, J. and Behrens III, W. W. (1972). The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome (1972), Universe Books, New York.
- Méral, P. (2012). "Le concept de service écosystémique en économie: origine et tendances récentes." *Natures Sciences Sociétés* **20**(1): 3-15.
- Meynard, J.-M., Aggeri, F., Coulon, J.-N., Habib, R. and Tillon, J.-P. (2006). Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants. R. à l. d. d. l'INRA. Paris, INRA.
- Meynard, J.-M., Dupraz, P. and Dron, D. (2002). Grande culture. D23 ATEPE (Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes), expertise collective, Les Dossiers de l'environnement de l'INRA.
- Meynard, J. (2010). Réinventer les systèmes agricoles: quelle agronomie pour un développement durable. Vers une société sobre et désirable. Paris: Presses Universitaires de France et Fondation Nicolas Hulot. D. Bourg and A. Papaux: 342-363.
- Meynard, J. and Girardin, P. (1991). "Produire autrement." *Le Courrier de la Cellule environnement de l'INRA* **15**: 1-19.

- Mitleton-Kelly, E. (2003). *Complex Systems and Evolutionary Perspectives on Organisations - The Application of Complexity Theory to Organisations. Ten Principles of Complexity & Enabling Infrastructures.*
- Moore, J. F. (1993). "Predators and prey: a new ecology of competition." *Harvard business review* **71**(3): 75-86.
- Nichols, W. F., Killingbeck, K. T. and August, P. V. (1998). "The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II. A landscape perspective." *Conservation Biology* **12**(2): 371-379.
- Norgaard, R. B. (2010). "Ecosystem services: From eye-opening metaphor to complexity blinder." *Ecological Economics* **69**(6): 1219-1227.
- Norgaard, R. B. and Bode, C. (1998). "Next, the value of God, and other reactions." *Ecological Economics* **25**(1): 37-39.
- O'Mahony, S. (2003). "Guarding the commons: how community managed software projects protect their work." *Research Policy* **32**(7): 1179-1198.
- Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of ecology.* Philadelphia, London, Toronto.
- Odum, H. T. and Odum, E. P. (2000). "The energetic basis for valuation of ecosystem services." *Ecosystems* **3**(1): 21-23.
- OECD (2001). *Valuation of Biodiversity Benefits*, OECD Publishing.
- Olson, M. (1965). *The Logic of Collective Action.* Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press.
- Ostrom, E. (2005). *Understanding Institutional Diversity.* Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Ostrom, E. (2007). "A diagnostic approach for going beyond panaceas." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**(39): 15181-15187.
- Ostrom, E. (2009). "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems." *Science* **325**(5939): 419-422.
- Paillard, S., Dorin, B. and Treyer, S., Coord. (2010). *Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*, Editions Quae.
- Paillotin, G. (2000). *Rapport au Ministre de l'Agriculture et de la Pêche - L'agriculture raisonnée.*
- Palmer, M. A. and Filoso, S. (2009). "Restoration of Ecosystem Services for Environmental Markets." *Science* **325**(5940): 575-576.
- Pearce, D. D. W. and Moran, D. (1994). *The economic value of biodiversity.* London, UK, Earthscan.
- Pearce, D. W., Barbier, E. B. and Markandya, A. (1990). *Sustainable Development: Economics and Environment in the Third World*, Earthscan.
- Pearce, D. W. and Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*, JHU Press.
- Pédro, G. (2007). *Sol, humus et nutrition des plantes : de la chimie agricole à l'agrogéochimie (du 18ème au 20ème siècle). Histoire et agronomie : entre ruptures et durée.* P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 121-137.

- Pelosi, C., Goulard, M. and Balent, G. (2010). "The spatial scale mismatch between ecological processes and agricultural management: Do difficulties come from underlying theoretical frameworks?" *Agriculture, Ecosystems & Environment* **139**(4): 455-462.
- Perfecto, I., Vandermeer, J. and Wright, A. (2009). *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*. London, England.
- Petrella (1996). *Le Bien commun, éloge de la solidarité*.
- Pettigrew, A. M. (1990). "Longitudinal field research on change: theory and practice." *Organization Science* **1**(3): 267-292.
- Pickett, S. T. and Cadenasso, M. (2002). "The ecosystem as a multidimensional concept: meaning, model, and metaphor." *Ecosystems* **5**(1): 1-10.
- Pinton, F., Ed. (2007). P. Alphantery, JP. Billaud, C. Deverre, A. Fortier and G. Géniaux (2007). *La construction du réseau Natura 2000 en France. Une politique européenne de conservation de la biodiversité à l'épreuve du terrain*. Paris, MEDD, IFB, La Documentation française.
- Pluvinage, J. and Mayaud, J. L. (2007). *De l'exploitation agricole du 19ème siècle à l'exploitation agricole multifonctionnelle du 21ème siècle. Histoire et agronomie : entre ruptures et durée*. P. Robin, J. P. Aeschlimann, C. Feller and S. Renoir. Paris, IRD: 405-414.
- Porter, M. E. (1998). *Clusters and the new economics of competition*. Watertown, Harvard Business Review.
- Power, A. G. (2010). "Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies." *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences* **365**(1554): 2959-2971.
- Pretty, J. (2008). "Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363**(1491): 447-465.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D. and Bennett, E. M. (2010). "Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**(11): 5242-5247.
- Requier, F., Odoux, J. F., Tamic, T., Feuillet, D., Henry, M., et al. (2012). *Dynamique temporelle de la sélection alimentaire chez l'abeille domestique (Apis mellifera L.) en paysage agricole*. Colloque Polinov. Prodinra. Poitiers, France.
- Robin, P. e., (ed.), A. J. P., (ed.), F. C. and (collab.), R. S. (2007). *Histoire et agronomie: entre ruptures et durée*, IRD Editions.
- Rodriguez, J. P., Beard, T. D. J., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S. J., et al. (2006). "Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services." *Ecology and Society* **11**(1): 28.
- Samuelson, P. A. (1954). "The pure theory of public expenditure." *The review of economics and statistics* **36**(4): 387-389.
- SCEP and Matthews, W. H. E. (1970). *Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action*. T. M. Press. Cambridge, MA.
- Schlager, E. and Ostrom, E. (1992). "Property-rights regimes and natural resources: a conceptual analysis." *Land economics* **68**(3): 249-262.
- Sebillotte, M. (1974). "Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome." *Cahiers de l'ORSTOM* **24**: 3-25.
- Sebillotte, M. (1996). *Les mondes de l'agriculture: une recherche pour demain*, Inra.

- Segrestin, B. (2006). Innovation et coopération interentreprises. Comment gérer les partenariats d'exploration? Paris, CNRS Editions.
- Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F. V., Lautenbach, S. and Schmidt, S. (2011). "A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead." *Journal of Applied Ecology* **48**(3): 630-636.
- Shannon, C. and Weaver, W. (1949). "Théorie Mathématique de la communication, les classiques des sciences humaines."
- Shelford, V. E. (1931). "Some concepts of bioecology." *Ecology* **12**(3): 455-467.
- Smith, S. M., Ward, T. B. and Finke, R. A., Eds. (1995). *The Creative Cognition Approach*. Cambridge, MA, USA, The MIT Press.
- Soule, M. E. and Wilcox, B. A. (1980). *Conservation biology. An evolutionary-ecological perspective*, Sinauer Associates, Inc.
- Stallman, H. R. (2011). "Ecosystem services in agriculture: Determining suitability for provision by collective management." *Ecological Economics* **71**: 131-139.
- Suh, N. P. (1990). *The Principles of Design*, Oxford University Press.
- Swinton, S. M., Lupi, F., Robertson, G. P. and Hamilton, S. K. (2007). "Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits." *Ecological Economics* **64**(2): 245-252.
- Tansley, A. G. (1935). "The use and abuse of vegetational concepts and terms." *Ecology* **16**(3): 284-307.
- TEEB (2010). "L'Économie des écosystèmes et de la biodiversité : Intégration de l'Économie de la nature. Une synthèse de l'approche, des conclusions et des recommandations de la TEEB."
- Tilman, D., Polasky, S. and Lehman, C. (2005). "Diversity, productivity and temporal stability in the economies of humans and nature." *Journal of Environmental Economics and Management* **49**(3): 405-426.
- Tischler, W. (1950). "Ergebnisse und Probleme der Agrarökologie." *Schrift. Landwirtschaft. Fakultät Kiel* **3**: 71-82.
- Tischler, W. (1965). *Agrarökologie*. Jena, Germany, Gustav Fischer Verlag.
- Tomich, T. P., Brodt, S., Ferris, H., Galt, R., Horwath, W. R., et al. (2011). "Agroecology: a review from a global-change perspective." *Annual Review of Environment and Resources* **36**: 193-222.
- Toutain, J. C. (1971). "La consommation alimentaire en France de 1789 à 1964." *Cahiers de l'ISEA, série AF* **12**.
- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I. and Thies, C. (2005). "Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management." *Ecology Letters* **8**(8): 857-874.
- Tucker, A. W. (1950). "A two-person dilemma." *Readings in games and information*: 7-8.
- Turner, R. and Daily, G. (2008). "The ecosystem services framework and natural capital conservation." *Environmental and Resource Economics* **39**(1): 25-35.
- Valette, E., Caron, A., Aznar, O., Maury, C., Hrabanski, M., et al. (2012). "Émergence de la notion de service environnemental dans les politiques agricoles en France: l'ébauche d'un

- changement de paradigme?" Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement **12**(3).
- van Noordwijk, M. and Ong, C. K. (1999). "Can the ecosystem mimic hypotheses be applied to farms in African savannahs?" *Agroforestry Systems* **45**(1-3): 131-158.
- Vanloqueren, G. and Baret, P. V. (2009). "How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations." *Research Policy* **38**(6): 971-983.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. and Melillo, J. M. (1997). "Human domination of Earth's ecosystems." *Science* **277**(5325): 494-499.
- Vittucci Marzetti, G. (2009). The fund-flow approach. A critical survey.
- Von Krogh, G. (2003). "Open-Source Software Development." *MIT Sloan Management Review* **44**(3): 14-18.
- Wahl, V., Meynard, J.-M. and Soler, L. G. (1985). "Traitements fongicides du blé d'hiver: quelles références pour l'aide à la décision?" *Phytoma* **365**: 17-22.
- Wallace, K. J. (2007). "Classification of ecosystem services: Problems and solutions." *Biological Conservation* **139**(3-4): 235-246.
- Warner, K. D. (2008). "Agroecology as Participatory Science Emerging Alternatives to Technology Transfer Extension Practice." *Science, Technology & Human Values* **33**(6): 754-777.
- Westman, W. E. (1977). "How much are nature's services worth?" *Science* **197**(4307): 960-964.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., et al. (2011). "Agroecology as a science, a movement and a practice." *Sustainable Agriculture* **2**: 27-43.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics; or control and communication in the animal and the machine*. Oxford, England.
- Wilson, E. O. (1988). *Biodiversity*, The National Academies Press.
- Wolff, A. (2001). *Conséquences des changements d'usage de l'espace rural sur l'utilisation de l'habitat et la dynamique des populations de la grande avifaune de plaine*, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Wood, C. L. and Lafferty, K. D. (2012). "Biodiversity and disease: a synthesis of ecological perspectives on Lyme disease transmission." *Trends in Ecology & Evolution* **28**(4): 239-247.
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K. and Swinton, S. M. (2007). "Ecosystem services and dis-services to agriculture." *Ecological Economics* **64**(2): 253-260.

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du rendement du blé tendre en France depuis 1950	10
Figure 2 : Formalisme de la théorie C-K.	19
Figure 3 : Les différentes voies envisagées pour augmenter la production agricole en France au cours de l'histoire.....	27
Figure 4 : Récapitulatif des différentes voies explorées pour améliorer la nutrition végétale du Néolithique au XXe siècle.....	35
Figure 5 : Le découplage des fonctions et des paramètres de conception des systèmes agricoles.	42
Figure 6 : La substitution progressive des cycles naturels par les techniques au cours de l'histoire de l'agriculture.....	43
Figure 7 : Rappel des principales notions et modèles introduits en écologie, et progrès de connaissances associés.....	77
Figure 8 : Interactions entre écologie et économie conduisant à l'évaluation économique des services écosystémiques.....	91
Figure 9 : Cadre d'analyse du concept de services écosystémiques	92
Figure 10 : Les différentes relations possibles entre variation de la biodiversité et variation des services écosystémiques.....	94
Figure 11 : Diversité des méthodes d'évaluation de la valeur économique de l'environnement....	98
Figure 12 : Libre interprétation de la modélisation des <i>common pool resources</i> par Ostrom (1990)..	114
Figure 13 : Le découplage des droits de propriété des biens communs.....	116
Figure 14 : Principales composantes de l'IAD Framework	117
Figure 15 : Les principaux sous-systèmes du cadre d'analyse des socio-écosystèmes (SES)	118
Figure 16 : Représentation schématique des différents courants de la littérature sur les biens communs.	127
Figure 17 : Carte représentant la superposition des territoires pris en compte dans l'étude de cas : ZPS Plaine de Niort Sud-Est, Zone Atelier, différentes zones de contractualisation MAET et zone de collecte de la coopérative (emprise CEA).....	141

Figure 18 : Chronologie des principales étapes de l'étude de cas.....	151
Figure 19 : Cartographie du raisonnement de conception des écologues aboutissant à la réintroduction de luzerne dans la plaine céréalière.....	154
Figure 20 : Représentation schématique de la mosaïque paysagère.....	156
Figure 21 : Représentation schématique des choix faits par les écologues pour aboutir à la proposition d'une filière courte de luzerne.....	167
Figure 22 : Raisonnement de conception de solutions visant à améliorer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement du point de vue des agriculteurs.....	168
Figure 23 : Quelques itinéraires techniques et leurs effets attendus concernant une sélection de services écosystémiques.....	171
Figure 24 : L'exploration de nouvelles formes de luzerne possibles	172
Figure 25 : Représentation de la façon dont un inconnu commun permet de réunir des espaces de conception initialement disjoints.....	194

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux modèles de l'écologie répertoriés dans la généalogie du Chapitre II	66
Tableau 2 : Différentes définitions et représentations possibles de la notion de services écosystémiques/ environnementaux	100
Tableau 3 : La coexistence d'une multiplicité de définitions des services écosystémiques dans la littérature.....	102
Tableau 4 : Comparaison de typologies de services écosystémiques tirées de la littérature	104
Tableau 5 : Récapitulatif des hypothèses concernant la conception des services écosystémiques dans les approches économiques	110
Tableau 6 : La distinction entre les différents types de biens en économie selon les principes d'exclusion et de rivalité	111
Tableau 7 : Récapitulatif des hypothèses identifiées dans les travaux d'Ostrom sur les <i>common pool resources</i>	123
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des termes introduits dans le modèle.....	195
Tableau 9 : Les différences de caractéristiques entre <i>common pool resources</i> et agro-écosystèmes du point de vue de la conception et de la gestion	202
Tableau 10 : Nouveaux enjeux de gouvernance de l'inconnu commun et implications managériales	208

Liste des acronymes

AAC : Aires d’Alimentation de Captage

ADASEA : Association départementale pour l'aménagement des structures des exploitations agricoles

CAD : Contrat d’Agriculture Durable

CEA : Coopérative Entente Agricole

CEBC : Centre d’Etudes Biologiques de Chizé

CETA : Centre d’études techniques agricoles

C-K : *Concept-Knowledge*

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CPR : *Common Pool Resources*

CTE : Contrat Territorial d’Exploitation

DIREN : Direction Régionale de l’Environnement

DOCOB : Document d’Objectifs d’une zone Natura 2000

FAO : Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture

FEDER : Fonds Européen de DEveloppement Régional

FNSEA : Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles

IAD : *Institutions Analysis Development*

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ITRS : *International Technology Roadmap for Semiconductors*

KCP : *Knowledge-Concept-Proposition*

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

MAE : Mesures Agro-Environnementales

MAET : Mesures Agro-Environnementales Territoriales

MEA : *Millenium Ecosystem Assessment*

NTIC : Nouvelles Technologies de l’Information et de la Communication

OGM : Organismes Génétiquement Modifiés

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

ORE : Observatoires de Recherche en Environnement

PAC : Politique Agricole Commune

PSE : Paiements pour Services Ecosystémiques

SCEP : Study on Critical Environmental Problems

SES : socio-écosystèmes

SEV : Syndicat des Eaux du Vivier

SMEPDEP de la Vallée de la Courance : Syndicat Mixte d’Etudes, de Production et de Distribution d’Eau Potable

TEEB : The Economics of Ecosystems and Biodiversity

ZPS : Zone de Protection Spéciale (Directive Oiseaux)

Publications & communications scientifiques produites dans le cadre de la thèse

Article accepté dans un journal à comité de lecture

Berthet E., Bretagnolle V. & Segrestin B. (2012) Analyzing the Design Process of Farming Practices Ensuring Little Bustard Conservation: Lessons for Collective Landscape Management, *Journal of Sustainable Agriculture*, 36:3, 319-336

Article soumis dans un journal à comité de lecture

Agogué, M., Berthet, E., Fredberg, T., Le Masson, P., Segrestin, B., Stoetzel, M., Wiener, M., Yström, A. (submitted in Research Policy) Towards an understanding of the role of innovation intermediaries in the “unknown”: A contingency approach

Communications

Agogué, M., Berthet, E., Fredberg, T., Le Masson, P., Segrestin, B., Stoetzel, M., Wiener, M., Yström, A. (2013) A Contingency Approach to Open Innovation Intermediaries: The Management Principles of the “Intermediary of the Unknown”, 13th Conference of the European Academy of Management (EURAM), “Democratizing Management”, Istanbul/TR, June 26-29

Bretagnolle, V. & Berthet, E. (2012) Managing grasslands biodiversity at a landscape level to foster ecosystem services in intensive cereal systems: from ecological knowledge to collective action, Second International Symposium on Integrated Crop-Livestock Systems. Porto Alegre, Brazil, October 8-12, 2012

Berthet, E., Segrestin, B. & Bretagnolle V. (2012) Governance challenges raised by the design of multiple ecosystem services in agricultural landscapes, Ecosummit, Columbus, OH, USA., 30 Sept-5 Oct 2012 - Oral communication

Berthet, E., Barnaud, C., Girard, N. & Labatut, J. (2012) Toward a reflexive framework to compare collective design methods for farming system innovation, The 10th European IFSA (International Farming Systems Association) Symposium, Aarhus, Denmark, July 1-4, 2012

Agogué, M., Berthet, E. & Hooge S. (2012) From ecology to management sciences : towards a modeling of the dynamics of stakeholders in an innovating ecosystem, 19TH IPDM (International Product Development Management) Conference, University Of Manchester, U.K., June 17-19, 2012

Berthet E. (2011) From common pool resources to collectively designed resources: A need for innovative governance systems. Poster presented at Elinor Ostrom's doctoral master class, Montpellier

Berthet E. (2011) La capacité d'innovation, un enjeu sous-estim  des politiques environnementales ? Cas de la mise en œuvre de Natura 2000 en plaine céréalière [Innovation capacity, an underestimated issue of environmental policy? Case of implementation of Natura 2000 in a cereal plain]. Colloque Ecologisation des politiques et des pratiques agricoles - INRA, Avignon, France

Berthet E. (2010) Innovative design for common goods: collective strategies and governance. The case of natural ecosystem management. IPDM Doctoral Workshop, Delft, The Netherlands. Oral presentation

Annexes

1. Quelques informations sur la luzerne



Fiche de synthèse sur la luzerne du GNIS :

http://www.prairies-gnis.org/pages/fiches_especes/13.htm

La luzerne est une légumineuse cultivée sur plus de 650 000 hectares en France, que ce soit "en pur" ou associée à une graminée. Plante de fauche par excellence, la luzerne offre des atouts très actuels : exigence réduite en intrants et autonomie de la production de protéines. Productive en été, elle sécurise les systèmes fourragers : sa résistance à la sécheresse reste bien sûr son atout-maître. Ses qualités en font un fourrage d'autant plus intéressant que la sélection a permis d'améliorer différents points, comme la résistance à la verse, la résistance aux maladies et la teneur en protéines. D'autre part, les techniques de conservation du fourrage sont désormais mieux maîtrisées.

PÉRENNITÉ : 3 à 4 ans

SEMIS : 15 à 20 Kg/ha

VITESSE D'IMPLANTATION : moyenne

NOMBRE DE VARIÉTÉS AU CATALOGUE FRANÇAIS : 56

CRITÈRES DE CHOIX DES VARIÉTÉS :

- type botanique (flamand ou provence),
- grosseur des tiges (résistance à la verse),
- résistance à la verticilliose,
- teneur en protéines,
- répartition du rendement

INTÉRÊTS DE L'ESPÈCE :

- bonne pousse estivale,
- fertilisation azotée inutile,
- très bonne valeur azotée,
- rendement élevé en bonnes conditions,
- s'associe bien avec le dactyle et le brome

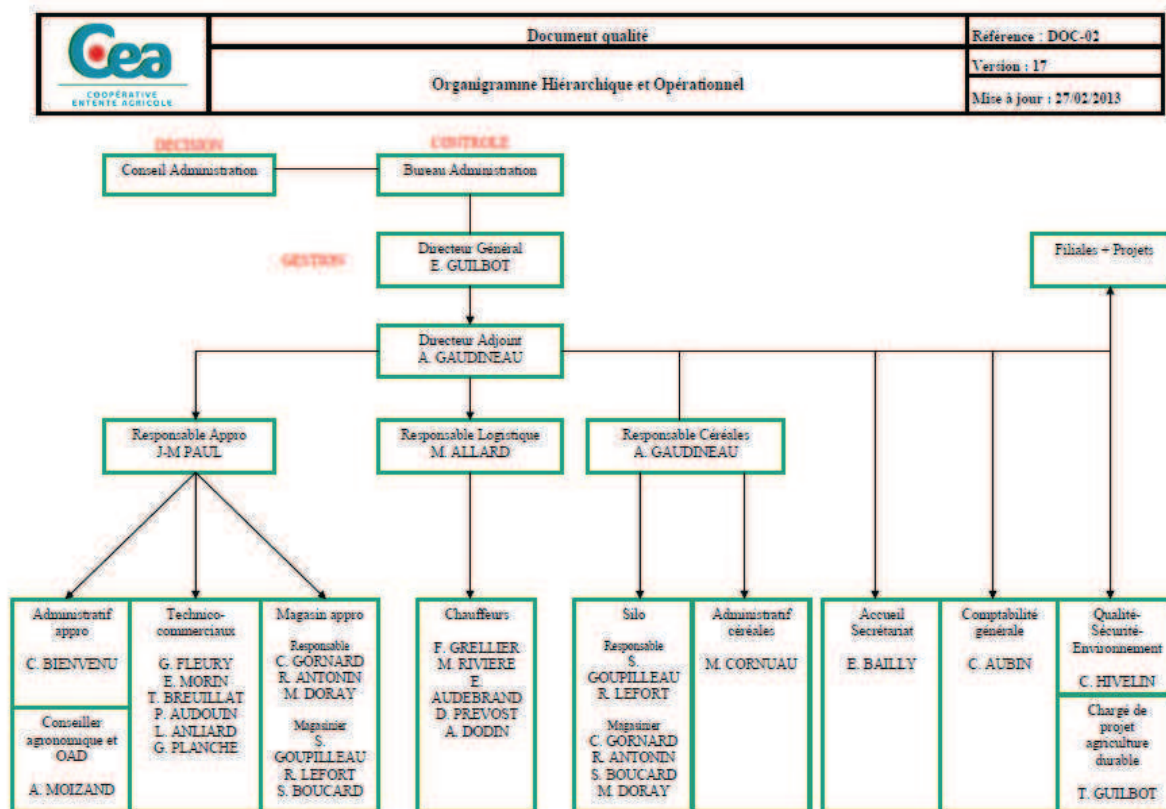
LIMITES DE L'ESPÈCE :

- sensible aux excès d'eau et à l'acidité,
- Ensilage difficile car pauvre en sucre (mauvaise conservation),
- risque de météorisation au pâturage

VALEUR ALIMENTAIRE : fourrage vert 1er cycle, début épiaison, en g/kg MS

• MS : 189	• PDIN : 112	
• MAT : 178	• PDIE	: 85
• MAD : 132		
• UFL : 0,73		
• UFV : 0,65		

2. Organigramme de la coopérative CEA



3. Listes des personnes rencontrées en entretien

a. Liste des personnes interrogées en mai-août 2010

Nom	Prénom	Organisme	Fonction
Attié	Carole	LPO	Coordinatrice du 2e programme LIFE outarde
Augiron	Steve	CEBC	Doctorant - thèse sur l'efficacité écologique des MAE
Berthomé	Jean-François	GODS	Coordinateur et animateur du DOCOB Plaine de Niort Sud-Est
Billaud	Jean-Paul	Université Paris Ouest	Sociologue, Directeur du LADYSS
Boucard	Madeleine	Anciennement au MEEDDM	DNP
Boutin	Jean-Marie	ONCFS	Responsable du CNERA Avifaune Migratrice
Bretagnolle	Vincent	CEBC	Directeur
Cadu	Julie	ADASEA 79 / chambre agriculture	Référente en charge de N2000 sur le département
Caillé	Olivier	SMEPDEP de la vallée de la Courance	Animateur
Cattan	Aline	ENGREF (+Ministère environnement)	Enseignant-chercheur
Fichet	Xavier	GODS	Directeur
Fillon	Bruno	Poitou-Charentes Nature	Chargé de mission
Grimaldi	Raphaël	CREN Poitou-Charentes	Responsable antenne 79
Houte	Sylvie	CEBC	Ingénieur de recherche
Jolivet	Christophe	A la LPO jusqu'en 2006	Coordinateur du premier programme LIFE outarde
Lafaiye	Aurélie	CG 79	Service Aménagements fonciers, Énergies, Randonnées
Liaigre	Mathieu	CEBC	Opérateur MAE
Loiseau	Loïc	DDT 79	Service d'économie agricole
Ménard	Catherine	DREAL Poitou-Charentes	Service Nature Sites et Paysages
Moinard	Philippe	FDSEA, vice-président Chambre d'agriculture 79	Agriculteur
Morisset	Jacques	SMEPDEP	Président du SMEPDEP + maire de Prin-Deyrançon
Rolland	Yann	DREAL Poitou-Charentes	Service Nature Sites et Paysages
SAMZUN	Jean-Jacques	DRAAF Poitou-Charentes	Economie agricole, forêt et environnement - Responsable productions végétales

b. Listes des personnes interrogées en janvier-février 2011

Nom	Fonction
Jacques Trouvat	Président CEA
Eric Guilbot	Directeur CEA
Arnaud Godineau	Responsable commercial CEA
David Suire	Administrateur CEA, polycult.- VA
Alain Rossard	Admin. céréaliier
Benoist Vignault	Admin. – polycult. VL
Thierry Pillot	Admin. – polycult.- VA
Florent Jacob	Eleveur caprin + céréaliier
Gaël Rousseau	Responsable Techniciens
Elodie Tourton	Technicien Productions Végétales (PV)
Sebastien Gindreau	Tech. PV
Elisa Morin	Tech. PV
Virginie Proust	Technicien Productions Animales (PA)
Francis Senechaud	Tech. PA
Jean-Marie Roustit	Conseil général 17
Olivier Caillé	Animateur SMEPDEP
Philippe Milliot	Apiculteur
Olivier Guérin	Chambre d'agriculture 17

4. Atelier de conception du 18 mai 2011

a. Liste des participants à l'atelier

Eric Guilbot	Directeur CEA
Arnaud Moizand	CEA
Elsa Berthet	Doctorante INRA, Mines Paristech
Vincent Bretagnolle	Directeur recherche CEBC
François Boissinot	ingénieur de recherche INRA
Camille Lalaurette	Stagiaire CEBC
Helmut Meiss	Post-Doc INRA-CEBC
Sylvie Houte	Ingénieur CEBC
Patrick Boucheny	
Mathieu Liaigre	Animateur MAE
Olivier Guérin	Technicien CA 17
Gilles Lemaire	INRA
Olivier Caillé	Animateur Smepep
Alexis Ingrand	Animateur Smepep
Audrey Bris	Animatrice Syndicat mixte d'alimentation en eau potable 4B
Guy Laluc	Presse agricole
Josélito Grollet	Agriculteur
Patrice Mialon	Agriculteur
Guillaume Comte	Agriculteur
Florent Jacob	Agriculteur
Guy Mandin	Technicien Nutrition Caprin
Jacques Trouvat	Président CEA
David Suire	Administrateur CEA
Georges Bello	Administrateur CEA
Alain Rossard	Administrateur CEA
Thierry Couton	Administrateur CEA
Benoît Vignaud	Administrateur CEA
Gaël Rousseau	Responsable Techniciens CEA
Elodie Tourton	Technicien PV
Sébastien Gindreau	Technicien PV
Elisa Morin	Technicien PV
Guy Fleury	Technicien PV
Virginie Proust	Technicien PA
Francis Senechaud	Technicien PA

b. Programme de l'atelier

Matinée: « Partage de connaissances »

6 exposés de 15 min + 10 min de questions

9h25-9h50: Exposé « gouvernance du projet, rôle de la coopérative »

Elsa Berthet, Doctorante INRA-Mines Paristech

9h50-10h15: Exposé « luzerne et biodiversité »

Vincent Bretagnolle, Directeur de recherche CEBC-CNRS

10h15-10h40: Exposé « les enjeux liés à l'eau »

Olivier Caillé, Animateur SMEPDEP

Audrey Bris, Animatrice Syndicat 4B

10h55-11h20: exposé « intérêts de la luzerne pour l'élevage »

Guy Mandin, Technicien Productions Animales

Claude Lonjard, contrôle laitier

11h20-11h45: exposé « enjeux de territoire, attentes des citoyens »

Guy Laluc, Editeur de la revue de presse agricole ARGOS

11h45-12h10: exposé « intérêts agronomiques et économiques de la luzerne »

Gilles Lemaire, Directeur de recherche INRA

François Boissinot, Ingénieur INRA

Olivier Guérin, Technicien Chambre d'Agriculture 17

Après-midi: travail de réflexion en groupe

13h20-13h30 : Introduction des ateliers et répartition des groupes

13h30-15h: 1e phase de réflexion en ateliers

15h00-15h10: pause / synthèse

15h10-15h40: 1e restitution collective (en plénière)

15h40-16h40: 2e phase de réflexion en ateliers

16h40-16h50: pause / synthèse

16h50-17h20: 2e restitution collective (en plénière)

Conclusion – fin à 17h30

c. Exemple de présentation des concepts projecteurs

La luzerne haut de gamme



- **Qualité, disponibilité**
- **Fiabilité**
- **Haute qualité environnementale**
- **SAV...**



- ▶ **Fonctions attendues**
 - ▶ Objectifs (cahier des charges)
 - ▶ Quels critères de performance, quels modes d'évaluation?
- ▶ **Moyens possibles ou à développer**
 - ▶ Quel système de production de luzerne viser?
- ▶ **Sur quels paramètres agir ? Itinéraire technique, transformation...?**
 - ▶ Solutions, nouvelles techniques?
- ▶ **Quel modèle économique?**
 - ▶ Que valorise-t-on? Quels sont les effets indirects?
 - ▶ Quels sont les bénéficiaires potentiels? Les débouchés?
 - ▶ Comment créer de la valeur? Label...?
- ▶ **Quel rôle pour la coopérative, pour les autres acteurs impliqués?**
- ▶ **Points durs pour la mise en œuvre du projet, obstacles à surmonter?**
 - ▶ Quelles compétences faut-il acquérir, quels apprentissages sont nécessaires?

5. Extraits du mémoire de C. Bouty et M. Bouviala (2012)

a. Extraits de la grille de notation de l'itinéraire technique « élevage intensif » : notation des services de production

Note d'un paramètre pour un

Pratiques Culturelles	Paramètres de la pratique culturale	Modalités retenues	Production	
			Rendement en tMS/ha/fauche	Qualité de la luzerne
semis	dates	fin été/ début automne	1/0	-1
	densité	moyenne	2	1
	implantation	conventionnelle	2	0
	variétés	variété pure		
	semences	certifiée	0	0
	TOTAL SEMIS		5/4	0
	TOTAL SEMIS APRES COEFFICIENT	x3	15/12	0
traitements contre les maladies		non		
traitement contre les ravageurs		non		
traitement contre les parasites		non		
désherbage chimique		oui	2	?
apports d'azote		oui	0	0
autres apports minéraux		oui	2	2
irrigation		oui	2	2
	TOTAL CONDUITE		6	4
fauche (à hauteur de fauche égale)	dates	avant floraison	-1	1
	suppression d'une coupe	non		
	hauteur de coupe (par rapport au sol)	basse	2	-1
	TOTAL FAUCHE		1	0
	TOTAL FAUCHE APRES COEFFICIENT	x3	3	0
floraison	date et zone de floraison	parcelle entière après exploitation	0	0
	TOTAL FLORAISON		0	0
	TOTAL FLORAISON APRES COEFFICIENT	x2	0	0

Note d'une pratique pour un service =
note intermédiaire après
multiplication par le coefficient de

Note globale pour un service

24/

Production

<u>Note moyenne</u> pour une catégorie de service	Rendement en tMS/ha/fauche	Qualité de la luzerne
	24/21	4
	28/25	

b. Les services écosystémiques pris en compte dans l’outil d’aide à la décision.

Production		Biodiversité		Sol		Ressource en eau		Intérêts agronomiques	
Rendement en tMS/ha/fauche	Qualité de la luzerne	Insectes pollinisateurs et auxiliaires	Biodiversité patrimoniale	Enrichissement du sol en C et en N	Erosion	Qualité de l'eau	Quantité d'eau	Gestion des bioagresseurs	Gestion des adventices

Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes Fonds écologique et inconnu commun

RESUME : L'agriculture fait face à une crise environnementale qui rend nécessaire la prise en compte du fonctionnement des « écosystèmes ». Mais ce concept de l'écologie donne peu de prise à l'action dans le secteur agricole. Les champs de littérature sur les « biens communs » et sur les « services écosystémiques », qui traitent de la gestion des écosystèmes, ont été abondamment développés et relayés par les politiques publiques. La thèse montre qu'ils cristallisent souvent les conflits entre les objectifs agricoles et les préoccupations écologiques sans pour autant permettre l'exploration de nouveaux systèmes agricoles.

Notre thèse en sciences de gestion met en évidence qu'un nouvel enjeu pour la recherche scientifique est d'apprendre à piloter les régulations écologiques au sein des agro-écosystèmes de manière à rendre l'agriculture durable. Elle cherche à définir les modalités d'une démarche de conception des agro-écosystèmes : peuvent-ils faire l'objet de démarches de conception innovantes ? Quelles sont les méthodes pour les concevoir ? Et quels sont les modes de gouvernance appropriés ?

L'analyse historique des raisonnements scientifiques en agronomie et en écologie met en évidence les raisons qui rendent difficiles aujourd'hui la conception des agro-écosystèmes, malgré les connaissances de plus en plus fines sur les régulations écologiques. La thèse modélise une classe d'objets particuliers, les « fonds écologiques », que les scientifiques introduisent pour aborder les agro-écosystèmes en s'affranchissant des seuls schémas connus. Elle montre l'intérêt de ne pas considérer les fonds écologiques comme des biens communs mais comme des « inconnus communs ». Le modèle proposé, testé sur un archétype de la production intensive en région céréalière, permet d'élaborer une méthode de conception collective et innovante des agro-écosystèmes.

Mots clés : conception, innovation, agro-écosystème, gouvernance, services écosystémiques, biens communs

Contribution to a design theory of agro-ecosystems Ecological fund and common unknown

ABSTRACT : Agriculture is facing an environmental crisis that makes it necessary to take into account the "ecosystem" functioning. But this concept of ecology is difficult to handle in the agricultural sector. Fields of literature on the "commons" and the "ecosystem services", which deal with the management of ecosystems, have been extensively developed and relayed by public policy. The thesis shows that they often freeze the conflict between agricultural objectives and environmental concerns without allowing the exploration of new farming systems.

Our thesis in management science highlights the fact that a new challenge for scientific research is to learn to manage environmental regulations within agro-ecosystems in order to make agriculture sustainable. It aims to define a design approach of agro-ecosystems: can innovative design be applied to them? What are the methods to design agro-ecosystems? And what are the appropriate modes of governance?

The historical analysis of scientific reasoning in agronomy and ecology highlights the reasons why the design of agro-ecosystems remains so difficult, despite finer knowledge on environmental regulations. The thesis models a particular class of objects, the "ecological fund" that scientists introduced to deal with agro-ecosystems while escaping the already known patterns. It shows the importance of considering the ecological funds not as common goods but as "common unknowns". The proposed model, tested on an archetype of an intensive cereal production area, makes it possible to develop a method of collective and innovative design of agro-ecosystems.

Keywords : design, innovation, agro-ecosystem, governance, ecosystem services, common goods

